

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robototechniky

Návrh programovatelného manipulátoru pro montážní  
výrobní linky

Design of programmable manipulator for assembly  
production lines

Student:

Radomír Běhal

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Zdeněk Konečný, Ph.D.

Ostrava 2011

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radomír Běhal**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T013 Robotika

Téma: **Návrh programovatelného manipulátoru pro montážní výrobní linky**  
**Design of Programmable Manipulator for Assembly Production Lines**

Zásady pro vypracování:

- 1) Analyzujte sortiment firmy ELVAC AUTOMATION s.r.o., vyberte vhodné komponenty pro automatickou montáž.
- 2) Analyzujte sortiment dostupných komponent pro návrh programovatelného manipulátoru.
- 3) Navrhněte varianty řešení montážní linky pro různé konstrukce manipulátoru. Hodnotovou analýzou vyberte optimální řešení.
- 4) Vybranou variantu manipulátoru podrobně zpracujte do formy technického řešení, včetně podkladů pro řízení.
- 5) Vypracujte technickou zprávu a výslednou výpočtovou dokumentaci zpracované varianty. Součástí diplomové práce bude výkres sestavy.
- 6) Vypracujte ekonomický rozpočet navržené varianty.

Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu editoru MSWORD a konstrukční řešení v CAD systému (podle pokynů vedoucího).

Seznam doporučené odborné literatury:

Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce. [online] Dostupné z www:

<<http://robot.vsb.cz/pozadavky-na-prace>>

ČSN 01 6910 Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory.

Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura.

Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

SKAŘUPA, J. *Kreativita a inovační myšlení v konstruování*. 1. vyd.

Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. 230 s. ISBN 978-80-248-1717-0. [online] Dostupné z www:

<[http://robot.vsb.cz/files/resources/kreativita\\_a\\_inovace.pdf](http://robot.vsb.cz/files/resources/kreativita_a_inovace.pdf)>

[SKAŘUPA, J - MOSTÝN, V. *Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů*.

1. vydání, Košice: Edice vědecké a odborné literatury – Strojní fakulta TU v Košicích, 2002. s 190. ISBN 80-88622-55-0

BURKOVIČ, J. *Navrhování RTP*. [online] Dostupné z www:

<<http://robot.vsb.cz/files/resources/navrhovani-rtp.pdf>>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Zdeněk Konečný, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



---

prof. Dr. Ing. Petr Novák  
*vedoucí katedry*



---

prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě, 23. 5. 2011



.....  
podpis studenta

## Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě, 23. 5. 2011



Radomír Běhal

Trvalé bydliště:

Nový Malín 510

788 03

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BĚHAL, R. *Návrh programovatelného manipulátoru pro montážní výrobní linky: diplomová práce.* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2011, 65 s. Vedoucí práce: Konečný Z.

Diplomová práce je zaměřena na konstrukční návrh manipulátoru pro montážní a manipulační aplikace. V úvodu je vypracovaná rešerše na vliv kinematické struktury a možnosti polohového řízení servopohonů pomocí PLC. Na základě zjištěných informací jsou navrženy 3 varianty řešení, které jsou podrobeny vícekritériálnímu hodnocení za účelem výběru optimální varianty.

Na základě optimální varianty je navržen manipulátor se čtyřmi stupni volnosti, s paralelní kinematickou strukturou. Dále byla vypracována inverzní úloha pro daný manipulátor. V závěru práce je nastíněna možnost řízení manipulátoru pomocí PLC a problémy s tím spojené.

## ANOTATION OF MASTER THESIS

BĚHAL, R. *Design of programmable manipulator for assembly production lines: Master Thesis.* VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2011, 65 p. Thesis head: Konečný Z.

The thesis is oriented of design construction of the manipulator for handling and assembly applications. At the beginning is drawn up the analysis of influence kinematic structure and possibility of position control of servo-drive through the use of PLC. On the basis of acquired information are proposed three alternative of solutions which are under multicriterial reviews to select an optimal alternative.

On the basis of optimal alternative is designed the manipulator with four DOF and with parallel kinematic structure. Has been further elaborated inverse theme for mentioned manipulator. In conclusion is proposed the possibility of manipulator control through the use of PLC and related problems.

# Obsah

Seznam použitého značení .....	1
Úvod .....	2
1. Rozbor současného stavu .....	3
1.1. Rozbor sortimentu ELVAC Automation s.r.o. ....	3
1.2. Analýza komponentů vhodných pro konstrukci manipulátoru .....	3
1.2.1. Pohony .....	3
1.2.2. Vedení vhodné pro manipulátor .....	4
1.3. Kinematické struktury robotů .....	6
1.3.1. Gantry .....	6
1.3.2. Scara .....	7
1.3.3. Paralelní struktura .....	8
1.4. Řízení servopohonu prostřednictvím PLC .....	9
1.4.1. Řízení pomocí sběrnice PROFIBUS .....	9
1.4.2. Řízení pomocí sběrnici RS485 .....	10
2. Požadavky na manipulátor .....	11
2.1. Typ činnosti .....	11
2.2. Požadavkový list .....	12
3. Varianty řešení .....	13
3.1. Varianta A .....	13
3.2. Varianta B .....	15
3.3. Varianta C .....	17
4. Volba optimální varianty .....	19
4.1. Zvolení požadovaných kritérií a přiřazení důležitosti .....	19
4.2. Určení významnosti kritérií .....	20
4.3. Bodové hodnocení jednotlivých variant dle kritérií .....	20
4.4. Výpočty celkových indexů variant .....	22
4.5. Zhodnocení výběru variant .....	22
5. Konstrukční návrh .....	23
6. Analýzy .....	25
6.1. Kinematická analýza polohového ústrojí .....	25
6.2. Kinematická analýza orientačního ústrojí .....	27
7. Konstrukce funkčních částí .....	28
7.1. Polohové ústrojí .....	28
7.1.1. Táhlo s kulovými klouby .....	29
7.1.2. Rameno .....	31

7.2.	Orientační ústrojí .....	33
7.2.1.	Teleskopická kloubová hřídel.....	33
7.2.2.	Interface deska .....	35
7.3.	Ground .....	38
7.3.1.	Pevnostní analýza základního rámu .....	38
8.	Volba pohonů .....	40
8.1.	Servomotor polohového ústrojí .....	40
8.1.1.	Analýza polohového ústrojí v Pro/Engineer.....	40
8.1.2.	Analytická kontrola v nejnepříznivějším stavu .....	41
8.1.3.	Namáhání výstupního ložiska servomotoru .....	43
8.1.4.	Kontrola ploského podélného klínu.....	44
8.1.5.	Kontrola dynamiky servomotoru.....	46
8.1.6.	Porovnání výsledků se zvoleným servomotorem .....	47
8.2.	Servomotor orientačního ústrojí .....	48
8.2.1.	Analýza orientačního ústrojí v Pro/Engineer .....	48
8.2.2.	Analytická kontrola orientačního ústrojí .....	49
8.2.3.	Namáhání výstupního ložiska servomotoru .....	50
8.2.4.	Kontrola dynamiky servomotoru.....	50
8.2.5.	Porovnání výsledků se zvoleným servomotorem .....	51
9.	Řízení.....	52
9.1.	Sestavení přímé a inverzní úlohy.....	52
9.1.1.	Přímá úloha.....	53
9.1.2.	Inverzní úloha .....	55
9.2.	Řídicí PLC .....	57
9.3.	Měniče .....	57
9.4.	Snímače a senzory .....	58
9.4.1.	Servomotor .....	58
9.4.2.	Snímač koncové polohy .....	58
10.	Ekonomické zhodnocení.....	60
11.	Závěr.....	62
12.	Použitá literatura.....	63
13.	Seznam příloh.....	65



## Seznam použitého značení

Zde je uvedeno ustálené značení. Veškeré potřebné značení je uvedeno a vysvětleno přímo u výpočtu.

Symbol	Význam	Jednotky
interface	Připojovací příruba	-
OM	Objekt manipulace	-
GCS	Globální souřadný systém	-
LCS	Lokální souřadný systém	-
t	Čas	s
a	Zrychlení	$\text{ms}^{-2}$
$\varepsilon$	Úhlové zrychlení	$\text{rads}^{-2}$
g	Gravitační zrychlení	$\text{ms}^{-2}$
v	Rychlost	$\text{ms}^{-1}$
$\omega$	Úhlové rychlost	$\text{rads}^{-1}$
n	Otáčky	ot / min
F	Síla	N
M	Krouticí moment	Nm
J	Moment setrvačnosti	$\text{kgm}^2$
m	hmotnost	kg
p	Tlak	MPa
f	Součinitel tření	-
k	Koeficient bezpečnosti	-
q	Váha významnosti	-
DC	Elektrotechnická značka „stejnoseměrný“	-
AC	Elektrotechnická značka „střídavý“	-
U	Elektrické napětí	V
A	Elektrický proud	A
P	Převodový poměr (proměnlivý)	-
i	Převodový poměr (ustálený) např. převodovky	-

## Úvod

Průmyslová automatizace je klíčovým prvkem pro udržení konkurenceschopnosti, zvyšování produktivity a kvality výrobků.

Robotizace a automatizace se v počátcích uplatňovala jen tam, kde nebylo možné nasadit pracovníka z důvodu bezpečnosti práce nebo přílišné náročnosti práce. V dnešní době již stupeň automatizace pokročil a roboty a manipulátory se aplikují prakticky v celé výrobní sféře jak strojírenské tak nestrojírenské.

Robot / manipulátor je nejzajímavějším prvkem automatizace právě z důvodu své všestrannosti. Robot, jak již bylo zmíněno, je vhodný pro pružnou automatizaci. Kinematická struktura robotu není navržena pevně pro danou činnost, nýbrž pro obsáhnutí určitého pracovního prostoru. Toto řešení umožňuje použít jeden typ stroje na více pracovních činnostech. Současně klade vyšší nároky především na řízení i na mechanickou soustavu stroje, což se následně projeví ve vysokých pořizovacích nákladech. A to jsou hlavní problémy, které brání masovému rozšíření robotů do menších a středních podniků.

Diplomová práce je zaměřena na návrh manipulátoru určeného pro manipulaci s OM do 0,5 kg. Snaha o snížení pořizovacích nákladů manipulátoru se soustředí na možnosti levnější varianty řídicího systému a na volbu vhodné kinematické struktury. V současné době je pro řízení robotů používán výhradně průmyslový počítač. Z důvodu snížení pořizovacích nákladů je v diplomové práci uvažováno o náhradě průmyslového počítače za programovatelný logický automat, tzv. PLC. Toto snížení pořizovacích nákladů robotů by se nejvíce projevilo u robotů s malou nosností určených především pro manipulaci, kde je procento pořizovacích nákladů na řídicí systém nejvyšší.

# **1. Rozbor současného stavu**

## **1.1. Rozbor sortimentu ELVAC Automation s.r.o.**

Firma Elvac Automation s.r.o. se zabývá výrobou rozvaděčů, jednoúčelových strojů, děrovací strojů a modernizací obráběcích strojů.

Po konzultaci s pracovníkem firmy Elvac Automation s.r.o., která je zadavatelem diplomové práce, došlo ke změně v zadání diplomové práce. Společnost Elvac Automation s.r.o. nechce manipulátor pro inovaci svých výrobních prostředků, ale jako nový výrobní sortiment. Manipulátor tedy nebude navržen pro konkrétní aplikaci, ale jako samostatný stroj.

## **1.2. Analýza komponentů vhodných pro konstrukci manipulátoru**

Konstrukce každého manipulátoru je jedinečná. Liší se z hlediska použití kinematických dvojic (lineární a rotační). Proto v této části budou analyzovány nejčastěji používané komponenty jako servopohony a rotační i lineární vedení.

### **1.2.1. Pohony**

Pohony jsou nedílnou součástí každého manipulátoru bez ohledu na kinematickou strukturu či počet stupňů volnosti. Nejvíce ovlivňují dynamiku, nosnost a jiné vlastnosti stroje. Protože je to nejdražší komponent manipulátoru, musíme být při výběru pohonu velice obezřetní. Firma Elvac Automation s.r.o. požaduje pouze elektrické pohony, proto jen tyto budou analyzovány.

Servomotory se skládají ze třech základních komponent: řídicího systému (vice v kap. 1.4.), měniče (řídicí jednotky) a vlastního servomotoru. V této kapitole budou probrány jen měniče a servomotory.

### **Více pólové servomotory**

Jsou levnější variantou polohování za použití krokového motoru. Motory jsou vyráběny v momentových řadách od 0,2 Nm po 15 Nm. Komunikace řídicí jednotky s motorem je přes sériovou linku. Výhodou je, že jedna řídicí jednotka může řídit až čtyři motory. Nevýhodou krokových motorů je, že při vysokých hodnotách zrychlení i zpomalení tzv. ztrácejí kroky, což vede ke ztrátě krouticího momentu.

Cena nejmenšího motoru ECOSTEP® (0,2 Nm) činí 8 684 Kč a řídicí jednotky 11 076 Kč. Ceny jsou bez DPH, [13].

### AC – servomotory

Jsou to motory pro vysoce dynamické aplikace. Tyto motory již potřebují složitější řízení, proto každý motor má svůj měnič (řídicí jednotku). Řídicí jednotky komunikují mezi sebou nebo i řídicím systémem nejčastěji přes sběrnici CAN. Na trhu se vyskytují pohony, které jsou kompletní, tzn. servomotor, převodovka, brzda i enecoder je jeden celek. Také se vyskytují modulární koncepce, kdy si zákazník z požadovaných komponent (výše zmíněných) sestaví pohon dle potřeby.

Servopohon od Harmonic Drive (11 Nm) stojí 32 800 Kč bez DPH, [6].

#### 1.2.2. Vedení vhodné pro manipulátor

Do této části jsou zahrnuty základní typy vedení, které mohou být pro konstrukci manipulátoru vhodné.

#### Rotační vedení

Zde bych chtěl představit speciální typ: ložisko se zkříženými válečky. Toto ložisko je výjimečné v tom, že umožňuje přenášet moment. Tzn., že pro vytvoření kinematické dvojice stačí pouze jedno ložisko, což vede ke značnému zmenšení zástavbového prostoru. Jejich nevýhodou je poměrně vysoká cena.

Např. cena ložiska THK (vnitřní  $\varnothing$  40 mm) se pohybuje od 3 000 Kč.

Níže je uvedena kompletní rotační jednotka vhodná pro modulární manipulátor [14.].



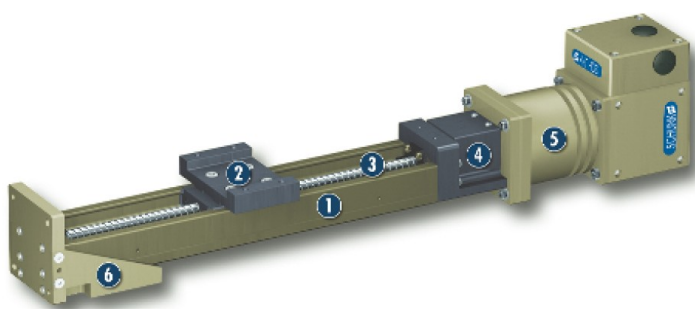
Obr. 1.1 Rotační modul Schunk PRL 80

## Lineární vedení

V dnešní době jsou již na trhu velice kvalitní lineární vedení s nejrůznějšími typy valivých tělísek, umožňující přenášet různé typy zatížení při nízkém tření. Největší problém je v jejich složitosti, přesnosti zpracování drah, vozíků a tudíž i vysoké ceně. K ceně vlastního vedení se musí připočítat cena transformačního ústrojí (zdroj energie je převážně rotační; nutnost ho převést na lineární). K tomu se s oblibou využívá kuličkového šroubu. Je to také nejpřesnější transformační prvek (přesnost vedení je cca 0,01 mm).

Př.: cena kuličkového šroubu THK  $\varnothing$  40 mm délka 500 mm činí cca 6500 Kč bez DPH.

Níže je představena kompletní lineární jednotka [14].



- 1) lineární vedení
- 2) vozík
- 3) kuličkový šroub
- 4) spojka
- 5) servomotor
- 6) připevňovací rám

**Obr. 1.2 Lineární modul Schnuk PLS 90**

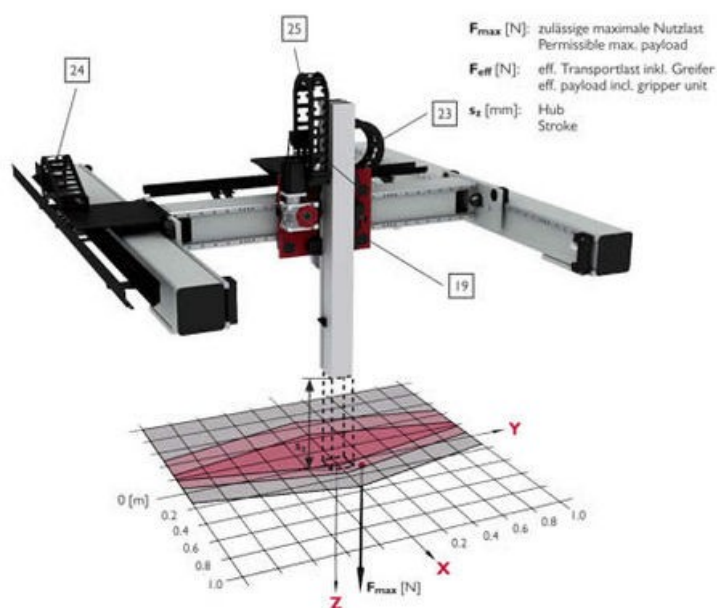
Velice často se nahrazují rotační i lineární vedení za kluzné plastové vedení. Lídrem těchto vedení je firma IGUS nabízející nejrůznější typy vedení. Výhodou plastového vedení je bezúdržbový provoz (absence mazání) a především nízká cena. Více [8].

### 1.3. Kinematické struktury robotů

V této kapitole budou představeny typy kinematických struktur, které jsou vhodné pro navrhovaný manipulátor.

#### 1.3.1. Gantry

Konstrukce je odvozena od portálových jeřábů. Tyto roboty se nejčastěji používají u manipulace s těžkými OM. Na obr. 1.4 je uveden manipulátor od firmy Güdel. Koncepce je modulární, skládající se ze tří lineárních jednotek.



Obr. 1.3 Modulární gantry robot Güdel

Technická data	
Pracovní prostor	Dle provedení, min. na osu 550 mm
Síla na koncovém bodě	60 N v ose x, y, z
Počet stupňů volnosti	3
Opakovaná přesnost	$< \pm 0,02$ mm
Max. akcelerace	$2,5 \text{ ms}^{-2}$
Max. rychlost	3,9 m/s

Tab. 1.1

Více informací [5.].

### 1.3.2. Scara

Sériová struktura typu scara od firmy Kuka. Tento typ kinematické struktury je výhodný pro manipulaci nebo kompletaci vzhledem k tomu, že poslední stupeň je translační. To dovoluje přesnou montáž a nevyžaduje tak přesný řídicí systém, jako třeba angulární struktura. Klouby jsou umístěny tak, aby pohony nemusely kompenzovat hmotnost jednotlivých ramen. Tyto reakce jsou zachyceny ložisky.

Tyto roboty byly, jako první nasazeny pro montáže v průmyslu. Nyní jsou montovány například do obráběcích strojů.



Obr. 1.4 Sériová struktura scara

Technická data	
Pracovní prostor	ø1100 - ø200 x 200 mm
Nosnost	5 kg
Hmotnost	20 kg
Počet stupňů volnosti	4
Opakovaná přesnost	< ±0,02 mm
Max. rychlost	7,1 m/s

Tab. 1.2

Více informací [10.].

### 1.3.3. Paralelní struktura

Paralelní struktury nejsou tak rozšířeny jako jiné typy. Spojení třech nebo čtyř ramen přináší výhody vyšší tuhosti a nízké hmotnosti pohybujících se hmot. Motory jsou umístěny v základu, což přispívá k dalšímu snížení hmotnosti pohyblivých hmot. Paralelní struktury se vyznačují vysokou rychlostí manipulace. Často se spojují s kamerovým systémem. Nacházejí uplatnění i v oborech jako pekařství a cukrářství.

Na obr. 1.5 je ukázána paralelní struktura, která má šest stupňů volnosti. Netradiční na ní je, že poslední stupně jsou řešeny jako sériová struktura.



Obr. 1.5 Paralelní robot Fanuc

Technická data Fanuc M-1iA/0.5S	
Pracovní prostor	ø720 x 100 mm
Nosnost	0,5 kg
Hmotnost	23 kg
Počet stupňů volnosti	6
Opakovaná přesnost	< ±0,02 mm
Max. rychlost ramene	3000 °/s

Tab. 1.3

Více informací [4.].



## 1.4. Řízení servopohonu prostřednictvím PLC

V této kapitole jsou uvedeny možnosti polohového řízení pomocí PLC. Pro ukázkou je použit PLC SIMATIC S7-1200, který se často používá pro řízení servopohonů.

Jako ukázkový případ jsou použity výrobky SIMENS a to měnič a servomotor:

### Technická specifikace

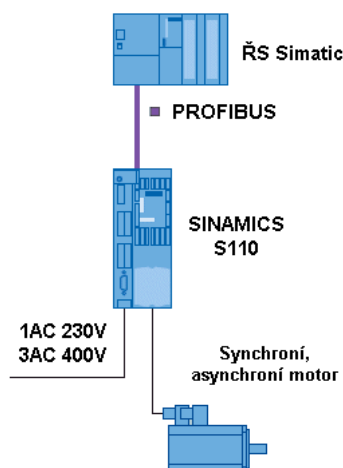
Měnič SINAMICS S110 pro polohové aplikace. Skládá se z řídicí jednotky CU305DP a výkonového modulu PM340. Servomotor při jednofázovém napájení obsáhne výkon od 0,12kW do 0,75kW, při třífázovém napájení pak od 0,37kW až do 90kW. Řídicí jednotka je vybavena bezpečnostními funkcemi kat.3 dle EN 954-1 a obsahuje 4xDI, 4xDI/DO, 3x bezpečné vstupy FDI, 1x AI, 1x PTC, 1x bezpečné FDO. SINAMICS S110 umožňuje připojení synchronních servomotorů 1FK7/1FT7 a asynchronních motorů. Je ideální pro aplikace zakladačů, manipulátorů, výměníků nástrojů, laboratorní automatizace apod., u nichž umožňuje připojit velké množství typů snímačů polohy.



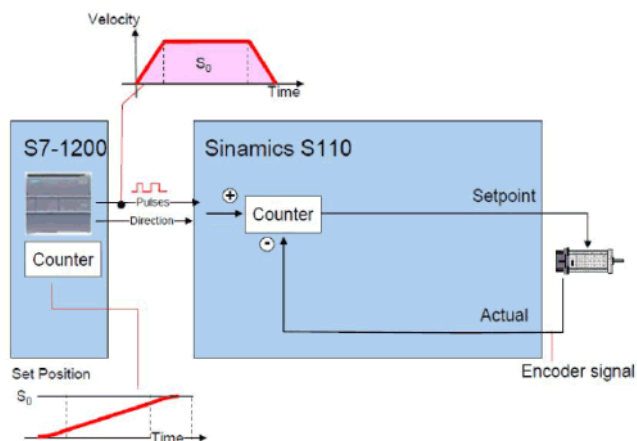
Obr. 1.6 Servomotor s měničem

### 1.4.1. Řízení pomocí sběrnice PROFIBUS

Řízení prostřednictvím PLC S7-1200 obstará tzv. technologický objekt. Ten je připraven v ukázkovém projektu polohování. V PLC programu jsou zadávány parametry jako rychlost, zrychlení / zpomalení a poloha.



Obr. 1.7

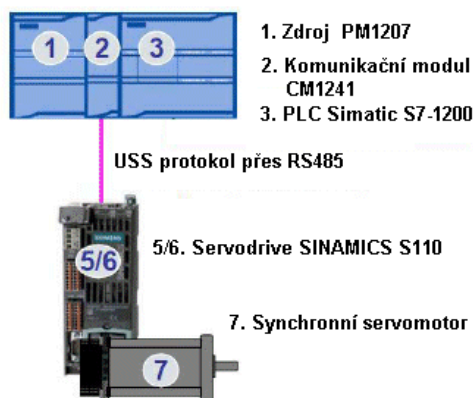


Obr. 1.8

#### 1.4.2. Řízení pomocí sběrnici RS485

Další varianta jednoduchého polohování se nabízí přes sběrnici RS485, která je standardně součástí každého měniče. Převážně u méně náročných aplikací je RS485 s USS protokolem ideální, protože při této variantě vychází polohování velmi levně, především, zapojíme-li v aplikaci na sběrnici více pohonů. Na jeden modul v S7-1200 je možné připojit až 16 pohonů; v praxi se ovšem tolik řízených pohonů nepoužívá.

Sběrnice RS485 musí být zakončena odpory, podobně jako PROFIBUS.



Obr. 1.9

Komunikace USS v PLC programu S7-1200 už nepoužívá technologický objekt, ale programové bloky.

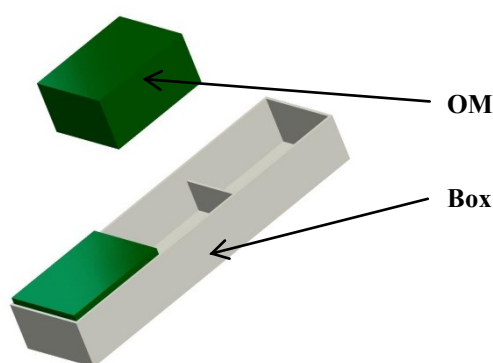
Více informací [3.].

## 2. Požadavky na manipulátor

### 2.1. Typ činnosti

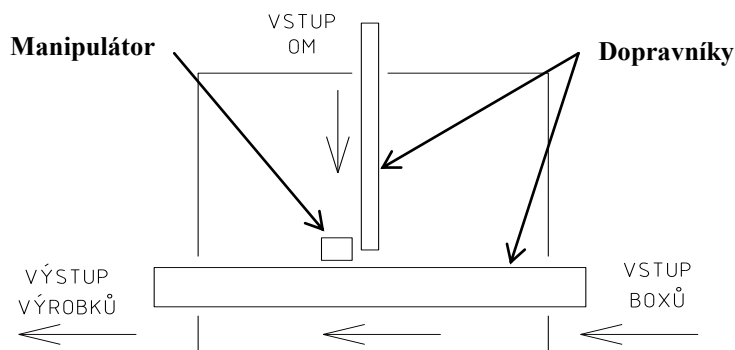
Z požadavků plyne, že manipulátor bude určen pro manipulaci. Proto je vhodné si zvolit vhodný OM, který bude zastupovat při výpočtech skutečný OM.

Pro aplikaci, která je uvedena především z důvodu výpočtů, byla zvolena montáž OM do boxů (viz obr. 2.1.). V boxu jsou připravené „kóje“, do kterých se zasouvá OM, což je velice náročné na přesnost polohování.



Obr. 2.1 Modelová montáž

Pracoviště pro zvolenou aplikaci by mohlo vypadat např. jako na obr. 2.2. Jedná se o montážní pracoviště, kde jako montážní prvek je manipulátor a jeho základní periferie tvoří dva dopravníky, které přivázejí OM a Box. Přesné umístění manipulátoru by bylo zpřesněno dle kinematické struktury a pracovního prostoru manipulátoru.



Obr. 2.2 Schéma pracoviště

## 2.2. Požadavkový list

Z požadavků specifikovaných v zadání, dalších požadavků plynoucích z návrhu aplikace a konkurence schopnosti, byl sestaven požadavkový list.

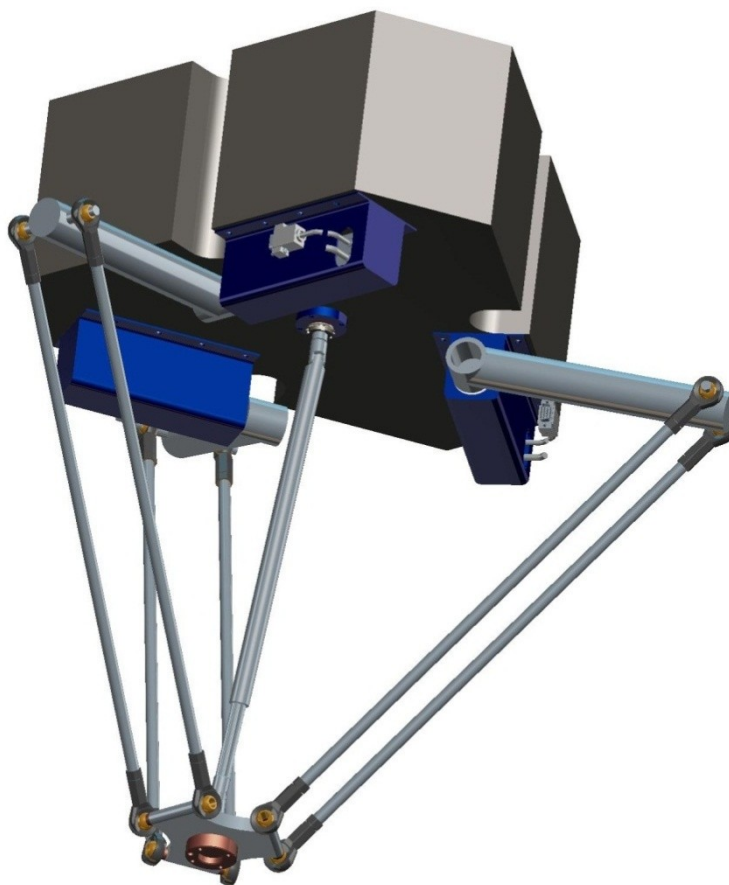
Požadavkový list	
Obecné požadavky	
Druh činnosti	Manipulace
Pracovní prostředí	Běžné prostředí při pracovní teplotě 20°.
Parametry robotického manipulátoru	
Druh pohonu robotického ramene	Elektropohony
Napájecí napětí	400/230 V
Nosnost koncového členu	Dle typu efektoru (cca 1,5 kg)
Zrychlení koncového členu	5 ms <sup>-2</sup>
Maximální rychlost	1 ms <sup>-1</sup>
Opakovaná přesnost	0,1 mm
Počet os	Není určeno (min. 4)
Dosah	0,5 m
Řízení	PLC
Požadavky na efektor	
Konstrukce	-
Hmotnost	max. 1,5kg
Nosnost	0,5 kg
Pohon	Pneumatický, elektrický
Objekt manipulace	
Materiál	Plast, hliník
Tvar	obecný
Rozměry	100 x 80 x 50

Tab. 2.1

### 3. Varianty řešení

Varianty jsou navrhovány s ohledem na využití co nejvíce normovaných nebo již vyráběných komponentů. Ceny variant byly určeny z cen komponentů. Pokud je uvažována jejich výroba, je cena odhadnuta z výrobní náročnosti, ceny materiálu a režie. Cena je bez DPH a není do ní zahrnuta cena montáže.

#### 3.1. Varianta A



Obr. 3.1

Varianta A je zpracována jako modulární paralelní struktura (viz obr. 3.1.). Pohyb koncového bodu je složen z natočení jednotlivých ramen. Orientační ústrojí je řešeno kloubovou teleskopickou hřídelí. Výstupní příruba interface je uložena tak, aby se síly od OM nepřenášely na kloubovou hřídel (kromě rotace v ose) a současně, aby byly zachyceny síly od kloubové hřídele. Táhlá jsou opatřena kulovými kluby na obou koncích.

Pro pohon byly navrženy krokové motory ECOSTEP54®. Tyto motory byly vybrány z důvodu minimalizace nákladů - jedna řídicí jednotka může řídit až čtyři motory.

Technické parametry	
Počet st. volnosti	4
Pracovní prostor	ø500 x 220 mm
Cena	66864,-

Tab. 3.1

### Zhodnocení varianty

#### Výhody:

- Vysoká rychlost
- Vysoká tuhost a přesnost polohování
- Vysoká dynamika vyplývající z nízké hmotnosti pohybujících se hmot
- Nižší náklady vzhledem k jednoduchosti a časté opakovatelnosti použitých součástí.

#### Nevýhody:

- Složité řízení z důvodu náročného vypracování inverzní úlohy a synchronizace jednotlivých pohonů.

### 3.2. Varianta B



Obr. 3.2

Varianta B byla navržena jako paralelní struktura se čtyřmi stupni volnosti, ovšem pro pohon polohovacího ústrojí jsou použity lineární aktuátory, které jsou na obou koncích opatřeny klouby. Ty umožňují dva rotační stupně volnosti. Z toho plyne jednodušší konstrukce a současně nevýhoda - redundance (neurčitost). Například: koncový bod má vykonat pohyb směrem dolů, může nastat případ, že místo toho začne interface rotovat. Toto se odstraní použitím šesti lineárních aktuátorů. Další nevýhoda, která plyne z použití lineárních aktuátorů, je jejich nedostatečná rychlost.

Orientační ústrojí je řešeno stejně jako u předchozí varianty pomocí kloubové teleskopické hřídele.

Technické parametry	
Počet stupňů volnosti	4
Pracovní prostor	ø600 x 220 mm
Nevýhoda	max. $v = 0,055\text{ms}^{-1}$
Cena	81959,-

Tab. 3.2

### Zhodnocení varianty

#### Výhody:

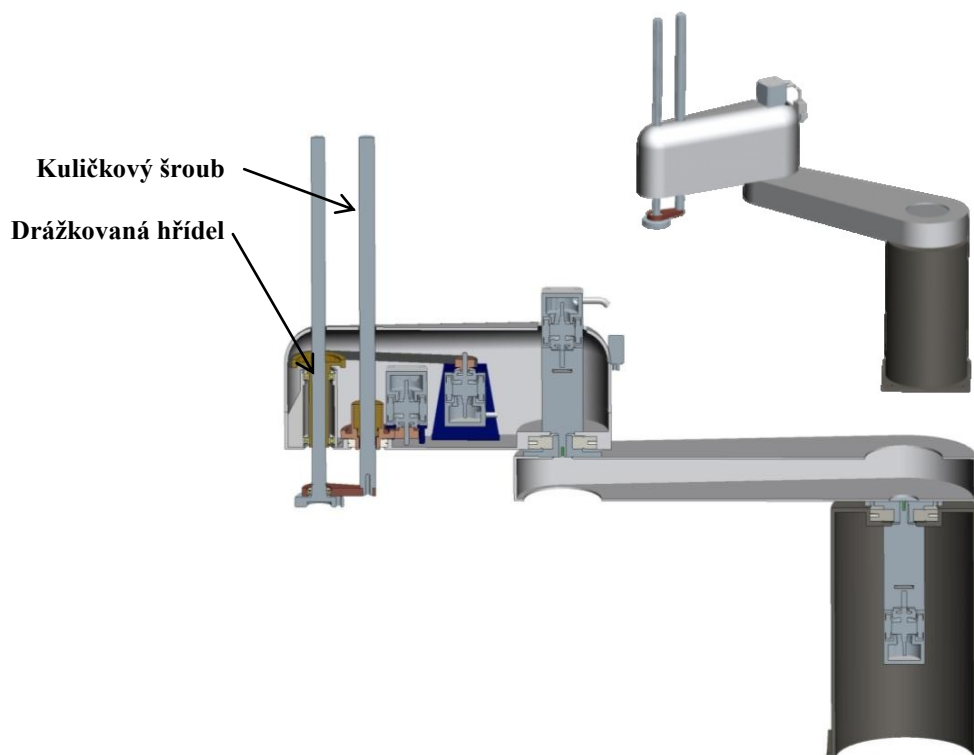
- Jednoduchá konstrukce.
- Použití levných lineárních aktuátorů.
- Z důvodu samosvornosti lineárních aktuátorů, není nutné použití brzdy.
- Nízké náklady.

#### Nevýhody:

- Redundance
- Nízká maximální rychlost i zrychlení.
- Složité řízení plynoucí z paralelní struktury.



### 3.3. Varianta C



Obr. 3.3

Varianta C je jako jediná konstruována jako sériová struktura typu scara. Uložení ramen je v ložiskách se zkříženými válečky. Tyto ložiska umožňují přenášet moment, proto stačí použít jedno ložisko a tím minimalizovat celý uzel. Orientační ústrojí je kombinací translační a rotační jednotky. Je tvořeno kuličkovým šroubem a drážkovanou hřídelí. Drážkovaná hřídel zajišťuje orientaci interface a je poháněna ozubeným řemenem. Současně zabráňuje protáčení kuličkového šroubu. Matice kuličkového šroubu je uložena v ložisku s tangenciálním dotykem valivých tělísek (tento typ umožňuje obousměrné axiální a radiální zatížení). Krouticí moment od motoru je na ni přenášen ozubeným soukolím.

Tato varianta nabízí největší pracovní prostor ovšem je nejsložitější. Tři ze čtyř motorů jsou umístěny ve druhém rameni. Těžiště je tedy umístěno dále od základu, což má za následek zvětšení momentu setrvačnosti a tedy i zhoršení dynamiky manipulátoru.

Technické parametry	
Počet st. volnosti	4
Pracovní prostor	ø1200-ø150 x 300 mm
Cena	104570,-

Tab. 3.3

### Zhodnocení varianty

#### Výhody:

- Jednodušší řízení, snadné vyřešení inverzní úlohy.
- Odlehčení motorů od hmotnosti jednotlivých ramen.
- Největší pracovní prostor z uvedených variant.

#### Nevýhody:

- Z důvodu sériové struktury musí být použita tužší ramena.
- Vyšší náklady z důvodu složitější konstrukce především ramen a orientačního ústrojí.
- Použití drahých komponent (kuličkový šroub, drážkovaná hřídel, ložiska se zkříženými válečky, atd.).

## 4. Volba optimální varianty

Pro zvolení optimální varianty bylo použito **hodnotové analýzy**. Tato analýza spočívá ve srovnávání jednotlivých kritérií, která jsou volena dle požadavkového listu. Aby bylo rozhodování co nejobjektivnější, podílí se v praxi na hodnocení jednotlivých variant více odborníků z různých profesí. Pro potřeby diplomové práce bylo nutné hodnocení variant zjednodušit.

### 4.1. Zvolení požadovaných kritérií a přiřazení důležitosti

Kritérium		Charakteristika kritéria
<b>K1</b>	Náklady	Minimalizace nákladů
<b>K2</b>	Složitost konstrukce	Náročnost na výrobu a komponenty
<b>K3</b>	Náročnost řízení	Vliv konstrukce na složitost řízení
<b>K4</b>	Rychlost	Max. dosažitelná rychlost
<b>K5</b>	Univerzálnost použití	Možnost funkce ve více polohách.

Tab. 4.1

Pro hodnocení variant v jednotlivých kritériích je použita pětibodová stupnice					
Body	0b	1b	2b	3b	4b
Popis	Nevyhovující úroveň	Nízká úroveň	Průměrná úroveň	Dobrá úroveň	Vysoká úroveň

Tab. 4.2

## 4.2. Určení významnosti kritérií

Přepočít voleb (v) na váhu významnosti (q)

Stupnice vah významnosti od 1 do 2.

$$q = f(v)$$

$$q = a \cdot v + b$$

↓

$$q = 0,25 \cdot v + 0,875$$

(4.1)

$$1 = a \cdot 0,5 + b$$

$$2 = a \cdot 4,5 + b$$

→

$$1 = a \cdot 0,5 + b$$

$$2 = a \cdot 4,5 + b$$

→

$$b = 1 - a \cdot 0,5$$

$$b = 1 - 0,25 \cdot 0,5$$

$$b = 0,875$$

Porovnávání v trojúhelníku párů						
Porovnávané páry kritérií				Počet voleb (v)	Pořadí	Váha významnosti (q)
<b>K1</b> K2	<b>K1</b> K3	<b>K1</b> K4	<b>K1</b> K5	4	1	1,875
	<b>K2</b> K3	<b>K2</b> K4	<b>K2</b> K5	3	2	1,625
		<b>K3</b> K4	<b>K3</b> K5	1	4	1,125
			<b>K4</b> K5	2	3	1,375
				0	5	0,875

Pozn.:  
Významnější kritérium je psáno tučně.

Tab. 4.3

## 4.3. Bodové hodnocení jednotlivých variant dle kritérií

Kritérium K1 – minimalizace nákladů		
Porovnávání pořizovací nákladů jednotlivých variant.		Body
<b>Varianta A</b>	66 864,-	4
<b>Varianta B</b>	81 959,-	3
<b>Varianta C</b>	104 570,-	2

Tab. 4.4

<b>Kritérium K2 – složitost konstrukce</b>		
Zhodnocení náročnosti na výrobu a použití normovaných nebo již vyráběných komponent.		Body
<b>Varianta A</b>	Výroba ramen.	3
<b>Varianta B</b>	Výroba kloubů umístěných na konci lineárních aktuátorů.	3
<b>Varianta C</b>	Na výrobu nejnáročnější varianta. Nachází se zde jak ozubené soukolí, tak ozubený řemen, uložení ložisek atd.	1

Tab. 4.5

<b>Kritérium K3 – náročnost řízení</b>		
Složitost sestavení inverzní úlohy a náležitostí spojené s řízením.		Body
<b>Varianta A</b>	Náročnost plynoucí z paralelní struktury.	2
<b>Varianta B</b>	Náročnost plynoucí z paralelní struktury.	2
<b>Varianta C</b>	Zvládnutá inverzní úloha i sestavní momentového řízení.	4

Tab. 4.6

<b>Kritérium K4 – rychlost</b>		
Maximální možná dosažitelná rychlost koncového bodu manipulátoru.		Body
<b>Varianta A</b>	Nejrychlejší varianta.	4
<b>Varianta B</b>	Lineární aktuátory nedosahují potřebné rychlosti, a proto tato varianta nesplňuje požadavky na rychlost uvedené v požadavkovém listě.	0
<b>Varianta C</b>	Varianta dokáže splnit požadavky, ale nároky na pohony zde budou vyšší než u varianty A.	3

Tab. 4.7

<b>Kritérium K5 – Univerzálnost použití</b>		
Možnost umístění manipulátoru		Body
<b>Varianta A</b>	Ze strany konstrukce zde není omezení.	4
<b>Varianta B</b>	Ze strany konstrukce zde není omezení.	4
<b>Varianta C</b>	Z principu struktury scara je možné tento manipulátoru umístit na podlahu nebo zavěsit na „strop“.	3

Tab. 4.8

#### 4.4. Výpočty celkových indexů variant

Ve výše uvedených tabulkách (4.4 až 4.8) byly jednotlivým variantám přidělené body. Tyto body jsou následně (v tab. 4.9) vynásobené váhou významnosti (určení vah významnosti pro jednotlivá kritéria, viz tab. 4.1) a je proveden celkový součet vážených indexů, který určil nejvýhodnější variantu.

Porovnání jednotlivých variant							
Kritérium	Váha významnosti kritéria ( q )	Varianta A		Varianta B		Varianta C	
		b.	Vážený index	b.	Vážený index	b.	Vážený index
K1	1,875	4	7,5	3	6,5625	2	5,625
K2	1,625	3	4,875	3	4,875	1	1,625
K3	1,125	2	2,25	2	2,25	4	4,5
K4	1,375	4	5,5	0	0	3	4,125
K5	0,875	4	3,5	4	3,5	3	2,625
Celkový součet vážených indexů			<b>23,625</b>		17,1875		18,5

Tab. 4.9

Pozn.: „b.“ jsou body přidělené jednotlivým variantám.

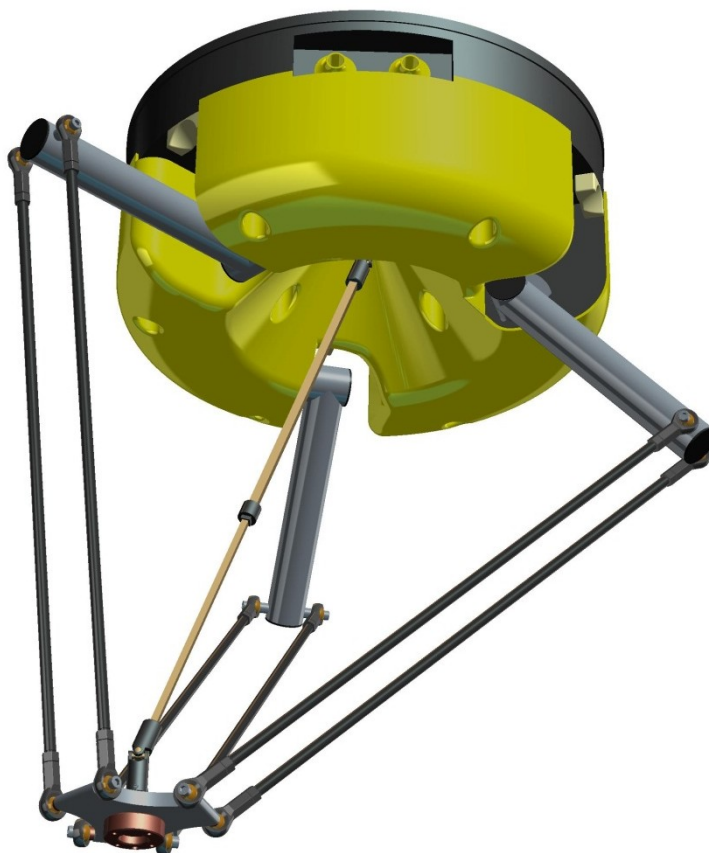
#### 4.5. Zhodnocení výběru variant

Varianta A byla vybrána jako optimální varianta z důvodů vysoké dynamiky i jednoduchosti konstrukce. Je také ekonomická právě proto, že řada komponent je použita vícekrát a to vzhledem k použití paralelní struktury. Jedinou nevýhodou této varianty je složité vypracování matematického modelu pro řízení.

Varianta C je také vyhovující. Ovšem složitější, především v konstrukci orientačního ústrojí. Také výroba ramen, které nesou pohony a převody, by byla náročná. Komponenty jako kuličkový šroub, drážkovaný hřídel i ložiska se zkříženými válečky tuto variantu prodražily a odsunuly na druhé místo.

Varianta B nesplňuje zadání, proto skončila na posledním místě.

## 5. Konstrukční návrh



Obr. 5.1

Byla navržena paralelní struktura se čtyřmi stupni volnosti a efektivním pracovním prostorem válcového tvaru.

Manipulátor byl navržěn tak, aby se minimalizovaly setrvačné hmoty. Proto jsou všechny pohony umístěny v základním rámu a pohyblivé části jsou z lehkých materiálů, jako jsou plasty, slitiny hliníku a uhlíkové kompozity.

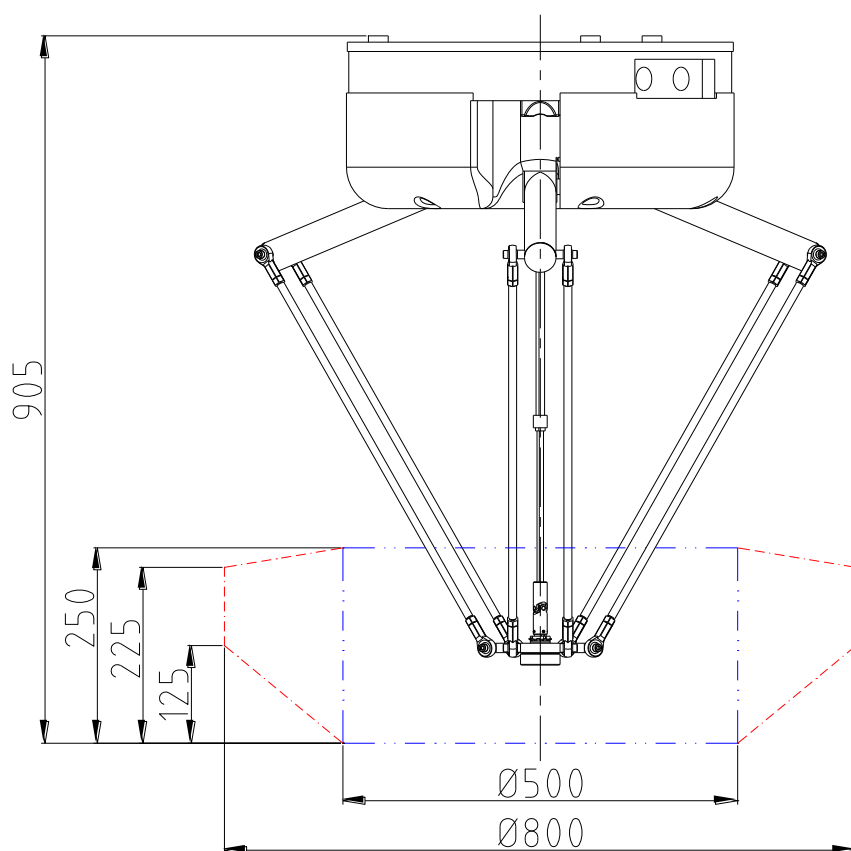
Technická data	
Počet stupňů volnosti	4
Max. rychlost koncového bodu	$1 \text{ ms}^{-1}$
Max. zrychlení koncového bodu	$5 \text{ ms}^{-2}$
Nosnost manipulátoru	1,5 kg
Hmotnost manipulátoru	20 kg
Efektivní pracovní prostor	$\varnothing 500 \times 250 \text{ mm}$

Tab. 5.1

## Pracovní prostor

Pracovní prostor je množina bodů, které je manipulátor schopen obsáhnout.

Největší omezení pro maximální dosah robotu představuje kloubová hřídel. Orientační ústrojí je konstruováno jako modulární, proto jsou uvedeny dva pracovní prostory (obr. 5.2). Modrou čarou je znázorněn tzv. efektivní pracovní prostor. Tento prostor je uvažován pro modelovou aplikaci popsanou v kap. 2.1. Červeně je pak znázorněn maximální pracovní prostor, který umožňuje manipulační ústrojí. Tento prostor je omezen především maximálním výkyvem kulových kloubů.



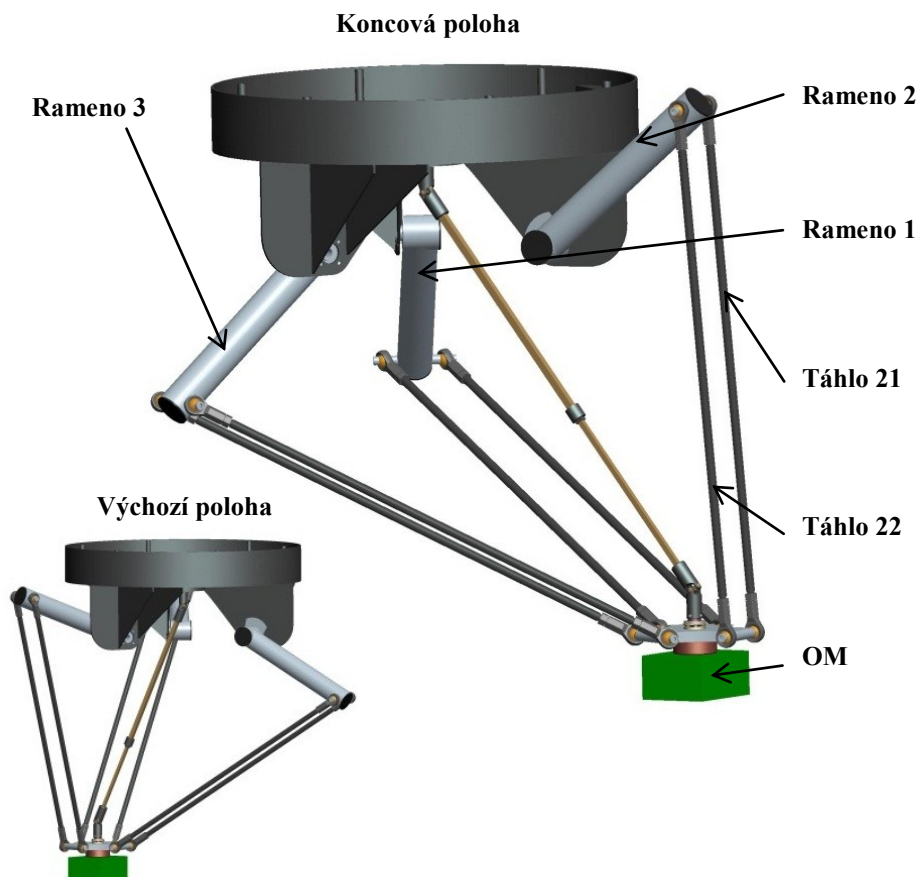
Obr. 5.2 Zobrazení efektivního a maximálního pracovního prostoru manipulátoru

V případě, že by byl požadován větší pracovní prostor než je efektivní, je zapotřebí vyměnit kloubovou hřídel. Kdyby docházelo k přetěžování motorů v krajních polohách pracovního prostoru, je nutno snížit v těchto polohách maximální zrychlení.

Pro další výpočty a analýzy je uvažováno s efektivním pracovním prostorem.



## 6. Analýzy

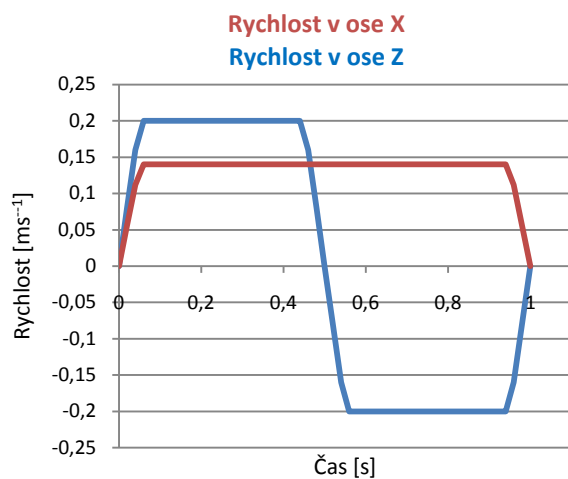


Obr. 6.1 Výchozí a koncová poloha při analýze

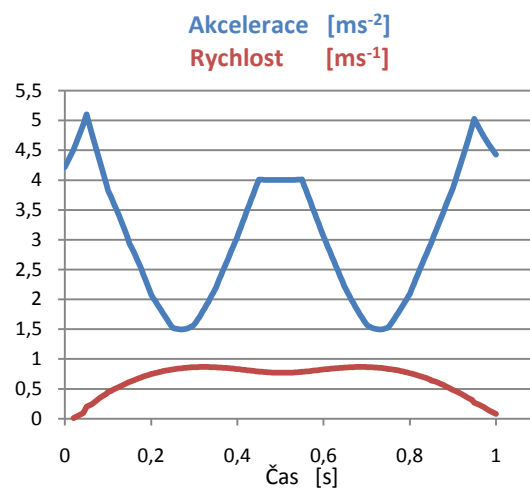
Analýzy byly provedeny v programu Pro/Engineer Wildfire 5.0. Model pro kinematickou a dynamickou analýzu byl zjednodušen, viz obr. 6.1. Byly použity vazby typu pin, slider, ball a 6DOF. Dále byl na manipulátor přidán OM o hmotnosti 1,5 kg, který zahrnuje i hmotnost efektoru.

### 6.1. Kinematická analýza polohového ústrojí

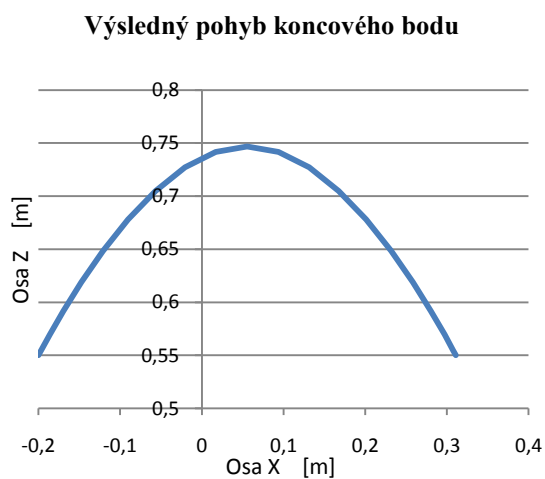
Byla nadefinována trajektorie koncového bodu s požadovanou rychlostí a zrychlením pomocí vazby 6DOF. Na základě této analýzy bylo zjištěno natočení jednotlivých ramen. Trajektorie koncového bodu byla zvolena rovinná mezi osami X a Z viz obr. 6.2. a to tak, aby byl co nejvíce zatížen motor na rameni 2. Volba rovinné trajektorie zjednoduší výpočet, protože hodnoty pro ramena 1 a 3 budou stejné - což je patrné z obr. 6.5.



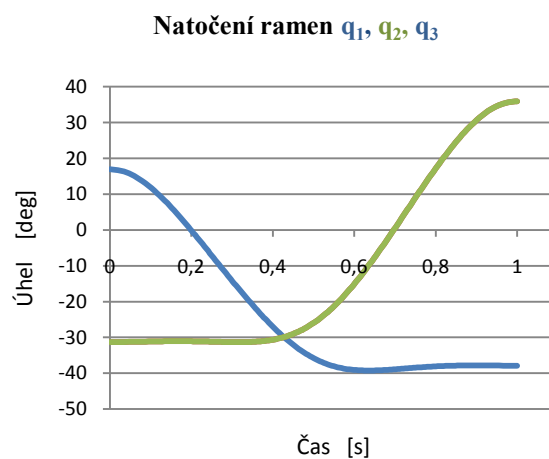
Obr. 6.2 Rychlost v jednotlivých osách



Obr. 6.3 Zrychlení a rychlost koncového bodu

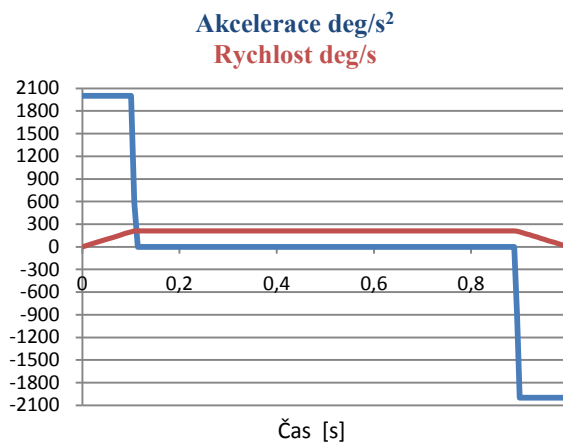


Obr. 6.4 Výsledný pohyb v rovině X a Z



Obr. 6.5 Natočení jednotlivých ramen

## 6.2. Kinematická analýza orientačního ústrojí



Obr. 6.6 Rychlost a zrychlení orientačního ústrojí

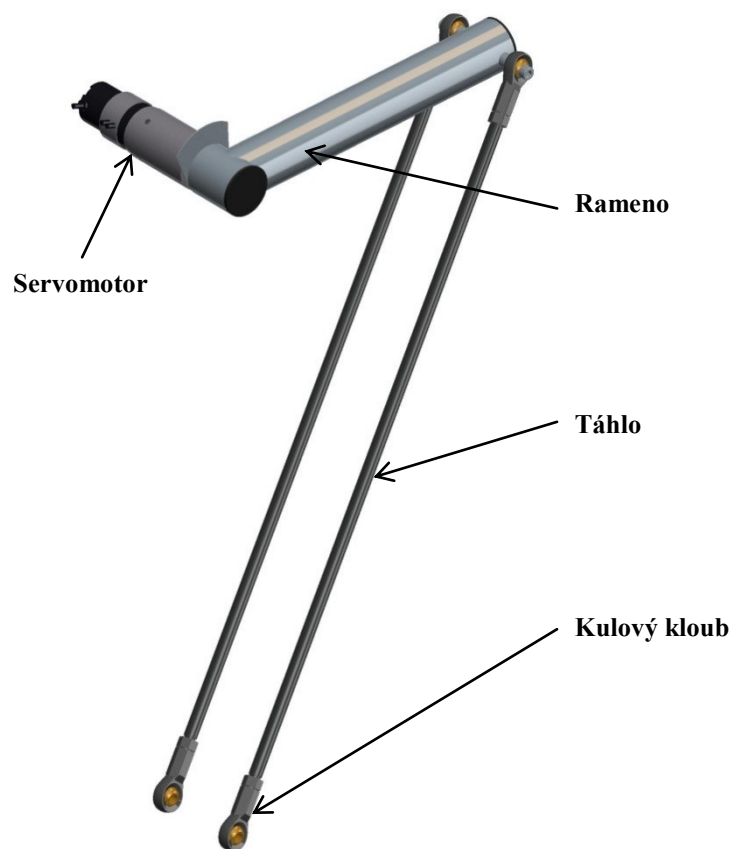
Na orientační ústrojí je požadavek, aby otočilo OM o  $180^\circ$  za sekundu. Na základě toho byla zvolena rampová funkce s maximálním zrychlením  $2000^\circ/\text{s}^2$  a max. rychlostí  $210^\circ/\text{s}$ , viz obr. 6.6.

Analýza orientačního ústrojí byla provedena současně s analýzou polohového ústrojí i samostatně a bylo zjištěno, že na pohon orientačního ústrojí to nemá vliv.

Na základě zde uvedených kinematických analýz jsou provedeny dynamické analýzy, jejichž výsledky jsou uvedeny u kontrol komponentů, které nejvíce zatěžují (kap.7).

## 7. Konstrukce funkčních částí

### 7.1. Polohové ústrojí



Obr. 7.1

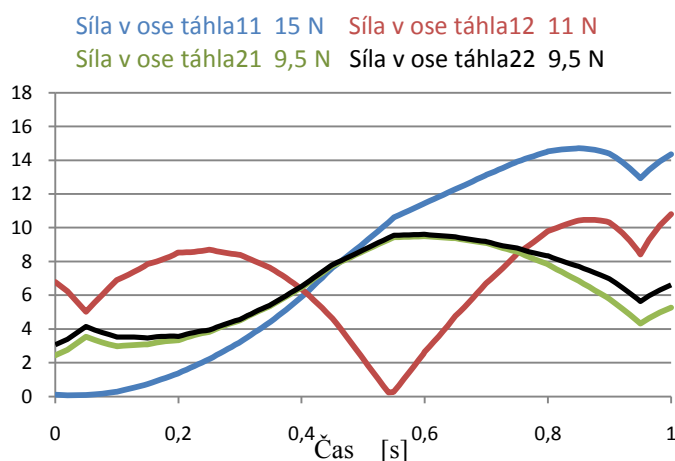
Trojice ramen vykonává základní tři stupně volnosti manipulátoru a to v ose x, y, z. Volnost se projeví na interface jako translační pohyb v již zmíněných osách. Toto je způsobeno trojicí paralelogramů, které jsou tvořeny táhly s kulovými klouby.

Polohové ústrojí zachytává a přenáší veškerá zatížení a dynamické účinky působící od setrvačných hmot manipulátoru a OM.

### 7.1.1. Táhlo s kulovými klouby

Táhlo je na obou koncích opatřeno kulovými hlavicemi Igubal - rozměrová série K CL, pouzdem B a s kovovou objímkou W300.

Na obr. 7.2 je uveden graf, který je naměřen při dynamické analýze, která má stejné parametry, jako kinematická uvedená v kap. 6.1.



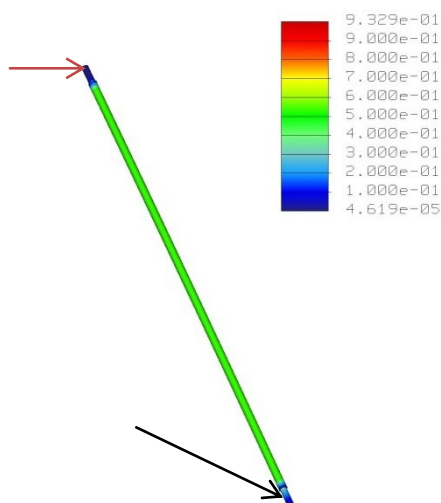
Obr. 7.2 Průběhy sil v ose táhla

Táhlo je namáháno pouze osovými silami. Průběhy těchto sil jsou znázorněny v grafu na obr. 7.2. V legendě jsou napsány síly, které jsou vloženy do pevnostní analýzy. Tyto síly jsou maximální síly jednotlivých složek bez ohledu na čas, ve kterém se maximum nachází.

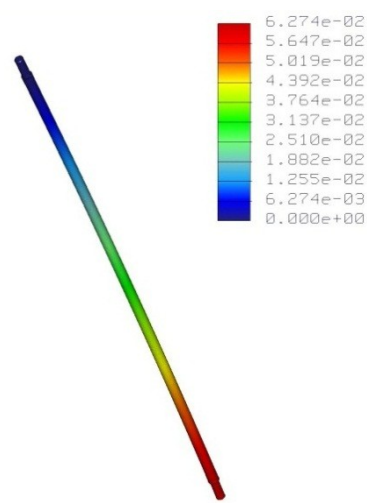
Toto platí pro všechny pevnostní analýzy. Z grafů s průběhy namáhání jsou pro pevnostní analýzu vybrány maximální hodnoty namáhání bez ohledu na čas, kdy působí.

### Pevnostní kontrola táhla

Vazba, která odebere všechny stupně volnosti je umístěna na plochu označenou červenou šipkou. Černou šipkou je označena plocha, na kterou je zavedena síla. Síla působí v ose táhla. Materiál táhla je kompozitní materiál karbon (MAGNUM CA9900, Youngův modul 4400 MPa [2.]).



Obr. 7.3 Napětí max. 0,93 MPa

Obr. 7.4 Deformace max. 6,27<sup>-2</sup> mm

Táhlo vyhovuje: napětí i deformace je v dovozených mezích.

### Kulová hlavice

Kulové hlavice jsou plastové s ocelovou vložkou. Byly zvoleny kvůli bezúdržbovému provozu a nízké pořizovací ceně.

Vzhledem k tomu, že ani výrobce nezná přesné chování materiálu při konkrétním zatížení, bylo by vhodné provádět testování. Pro účely diplomové práce není možné provádět testování - proto byla kulová hlavice předimenzovaná. Předimenzování je vhodné i z hlediska tuhosti.

Kulová hlavice KBRM – 08 CL MH			
	Dovolené hodnoty		Působící síla
	V ose táhla	Boční	
Max. cyklická síla (při 1 miliónu cyklů)	440,7 N	104,9 N	15 N
Max. krouticí moment spojení	1,4 Nm		
Výchylka při používání	0,0071mm		
max. úhel	35°		33°

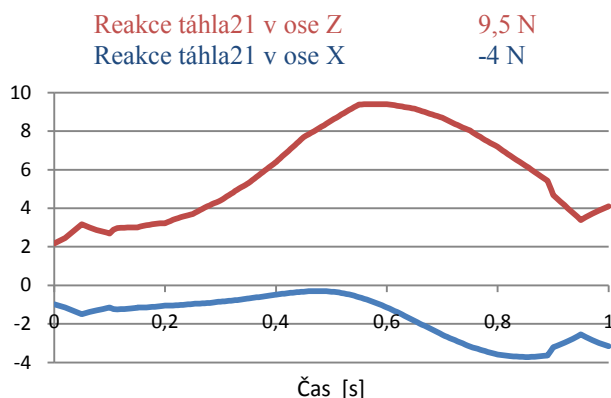
Obr. 7.5

Celý výpočet životnosti je uveden v příloze 3.

Více informací o kulové hlavice [8.].

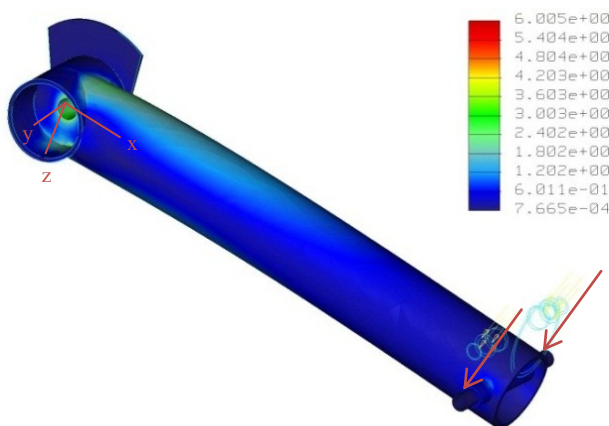
### 7.1.2. Rameno

Na rameno působí několik typů zatížení. Ohyb - převážně od ramene 2 a smíšený ohyb a krut - od ramen 1 a 3. Proto byly provedeny dvě pevnostní kontroly a to pro rameno 2 a další kontrola pro ramena 1,3.

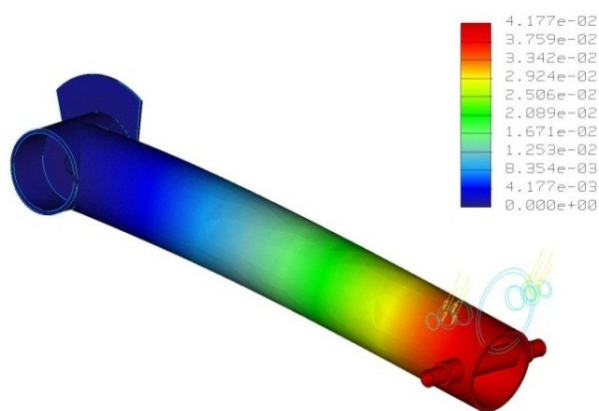


Obr. 7.6 Průběhy zatížení ramen 2 od táhla 21v LCS

Rameno je na ohyb namáháno nejvíce při analýze ramene 2. Na obr. 7.6 je ukázán průběh síly od táhla 21 v LCS (znázorněn na obr. 7.7 červeně). Na rameno působí i táhlo 22, které má shodný průběh sil jako táhlo 21. Síly působící od táhel 21 a 22 byly umístěny na plochu, která je kontaktní s kulovým kloubem (znázorněno červenými šipkami). Rameno je uloženo na díru, se kterou se rameno spojuje s hřídelí servomotoru (díra, kde je umístěn LCS) vazbou, která odebere šest stupňů volnosti. V legendě grafu na obr. 7.6 jsou uvedeny hodnoty, které jsou použity v pevnostní analýze. Materiál ramene je slitina hliníku s Youngovým modulem 73084.4 MPa. Přesné dovolené napětí pro slitinu hliníku se nepodařilo zjistit, proto volím dovolené napětí pro hliník 30 MPa, které je nižší než u slitiny hliníku [11.].



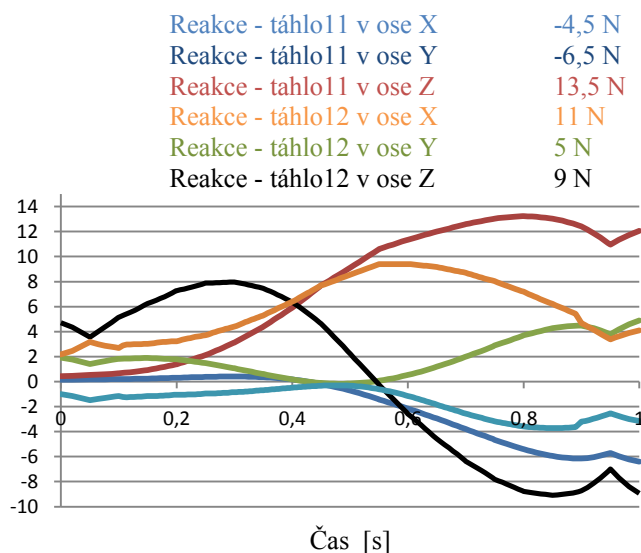
Obr. 7.7 Napětí při ohybu 6 MPa



Obr. 7.8 Deformace při ohybu 0,042 mm

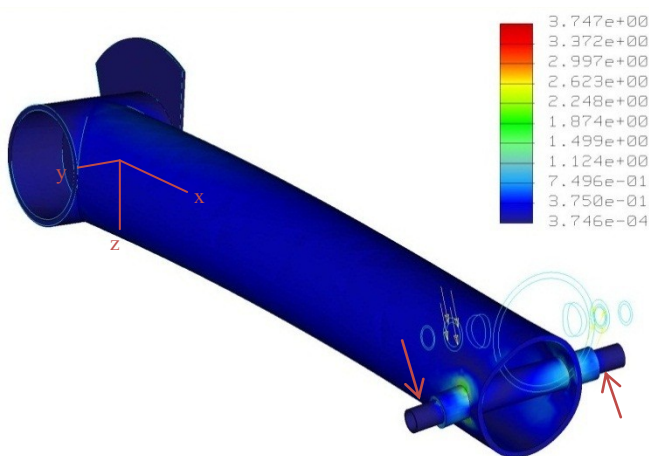
## Krut ramen

Nejvíce namáhané na krut jsou ramena 1 a 3, vyplývající z průběhu sil znázorněného na grafu na obr. 7.9. Nejvíce se toto namáhání projevuje při koncové poloze. Jak již bylo uvedeno, zatěžující síly pro ramena 1 a 3 jsou stejné, proto bude provedena jen pevnostní kontrola ramene 1.

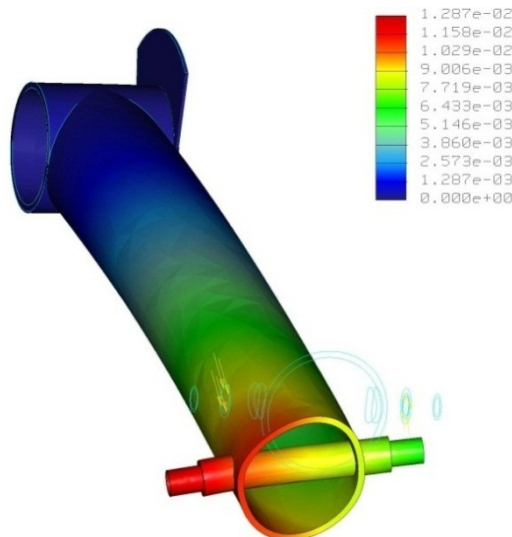


Obr. 7.9

Průběh namáhání ramene 1 od táhel 11 a 12 uvedený na obr. 7.9. Průběhy jsou vztaženy k LCS a jsou znázorněny červeně na obr. 7.10.



Obr. 7.10 Napětí při krutu 3,75 MPa

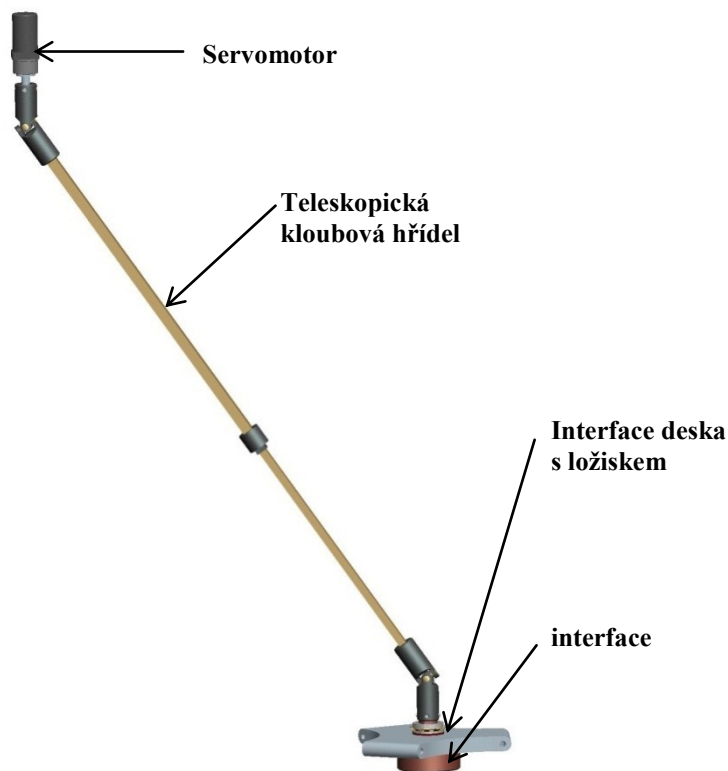


Obr. 7.11 Deformace při krutu 0,013 mm

Rameno vyhovuje při obou typech namáhání: napětí činí  $6 \text{ MPa} < 30 \text{ MPa}$  i deformace je v dovolených mezích.



## 7.2. Orientační ústrojí



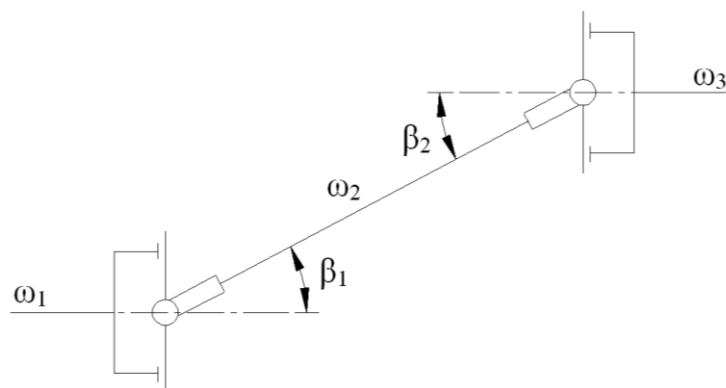
Obr. 7.12

Orientační ústrojí zajišťuje rotaci OM okolo svislé osy. Je řešeno modulární koncepcí tudíž pro aplikace, kde nebude vyžadována orientace OM, nemusí být na manipulátor orientační ústrojí montováno a efektor se připojí na Interface desku. Tato změna bude mít vliv i na snížení nákladů.

### 7.2.1. Teleskopická kloubová hřídel

Kloubová hřídel přenáší krouticí moment na interface. Byla zvolena teleskopická kloubová hřídel vyrobená kombinací materiálů plastu a bronzu. Výběr byl proveden s ohledem na minimální hmotnost.

Jak již bylo zmíněno kloubová hřídel je limitující prvek pracovního prostoru. Splňuje základní technické požadavky a její pořizovací náklady jsou menší, než kdyby se měla samostatně vyrábět jen pro účely tohoto manipulátoru.



Obr. 7.13 Kinematické schéma kloubového hřídele

### Převodový poměr kloubového hřídele

Dle [9.]

Úhel  $\alpha_i$  je úhel pootočení jednotlivých hřídelí.

$$P_k = \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot \frac{\omega_3}{\omega_2} \rightarrow \frac{\frac{d\alpha_2}{dt}}{\frac{d\alpha_1}{dt}} \cdot \frac{\frac{d\alpha_3}{dt}}{\frac{d\alpha_2}{dt}} \quad (7.1.)$$

$$P_k = \frac{\cos\beta_1}{1 - \sin^2\beta_1 \cdot \sin^2\alpha_1} \cdot \frac{1 - \sin^2\beta_2 \cdot \sin^2\alpha_3}{\cos\beta_2} = 1$$

Podmínky konstantních otáček výstupních hřídelí, tj.  $\omega_3 = \omega_1$  a  $\alpha_3 = \alpha_1$ :

- úhly  $\beta_1$  a  $\beta_2$  se musejí navzájem rovnat:  $\beta_1 = \beta_2$ ,
- obě rozvidlení středního hřídele musí ležet v jedné rovině,
- všechny tři hřídele musí ležet v jedné rovině, v opačném případě by nebyla splněna podmínka stejných úhlů  $\beta_1, \beta_2$ .

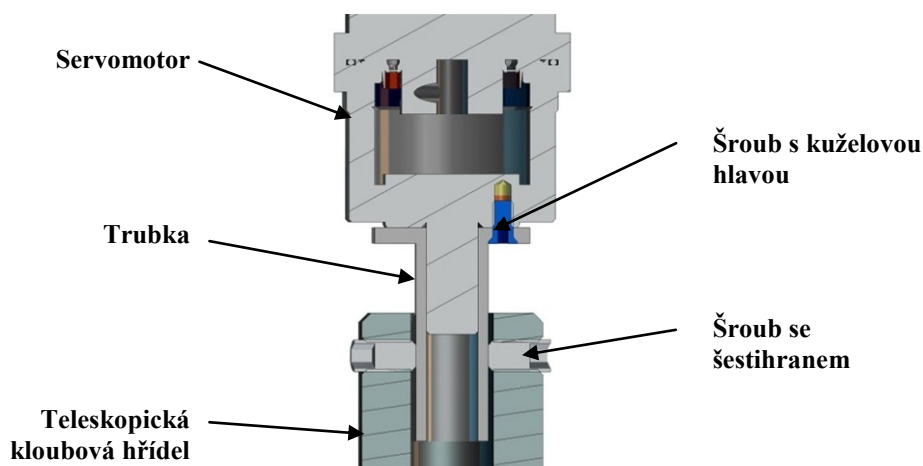
Při splnění uvedených podmínek se nerovnoměrně otáčí pouze vložený prostřední hřídel.

Kloubová hřídel – HUCO-POL G16BC Ni		
	Dovolené hodnoty	Působící
Max. krouticí moment	1,6 Nm	0,12 Nm
Statický moment na mezi pevnosti	1,4 Nm	
Max. vysunutí	280 mm	
max. úhel	25°	23°

Tab. 7.1

Více informací o kloubové hřídeli [7.].

### Připojení teleskopické kloubové hřídele

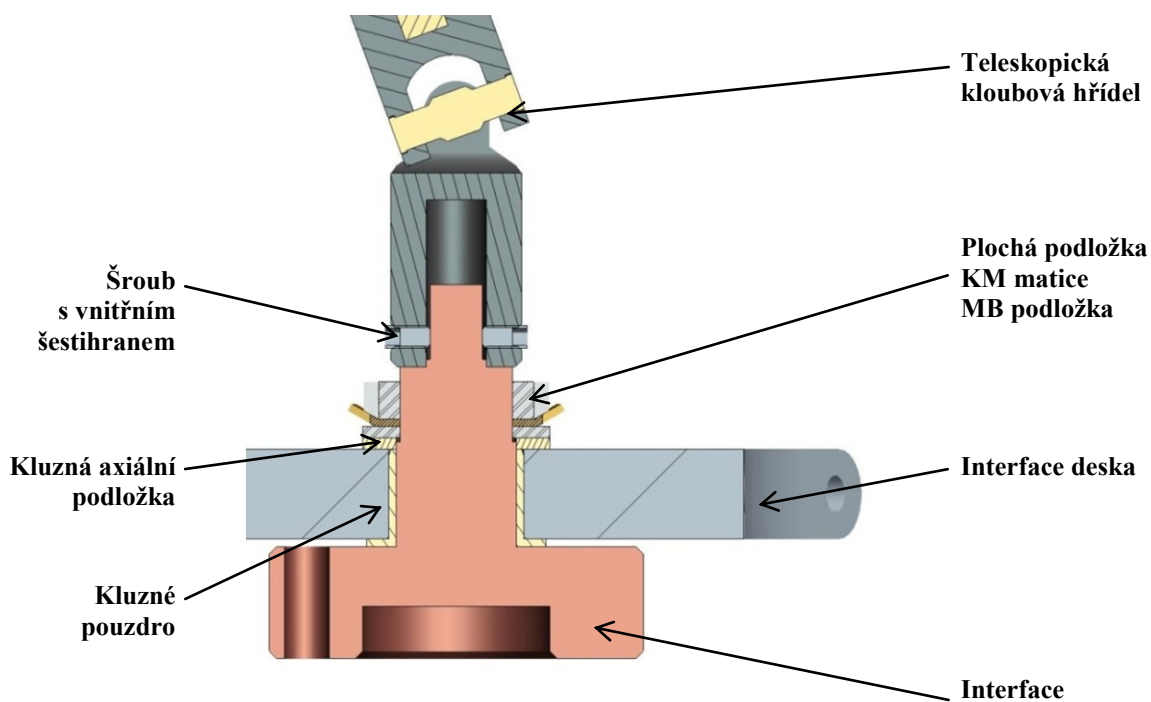


Obr. 7.14 Připojení kloubového hřídele k servomotoru

Krouticí moment je přenášen od servomotoru přes šrouby na trubku (obr. 7.14). Tato trubka je opatřena v místě, kde na ni dosedá šroub s šestihranem se zbroušenými plochami. Pro zlepšení především axiální únosnosti doporučuji do trubky zhotovit důlky v místech, kde na ni dosedá šroub. V tom případě šroub musí být opatřen kuželovým čelem.

#### 7.2.2. Interface deska

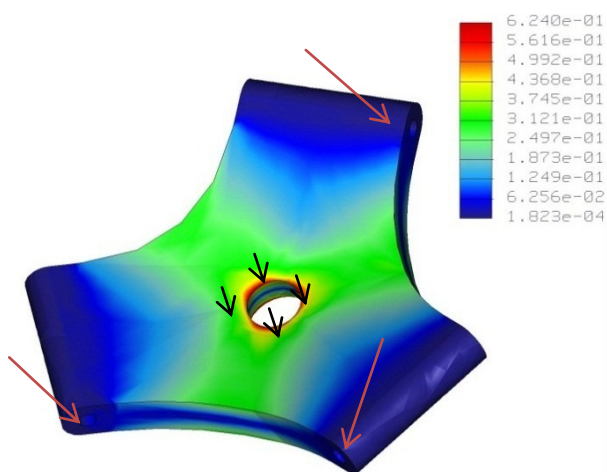
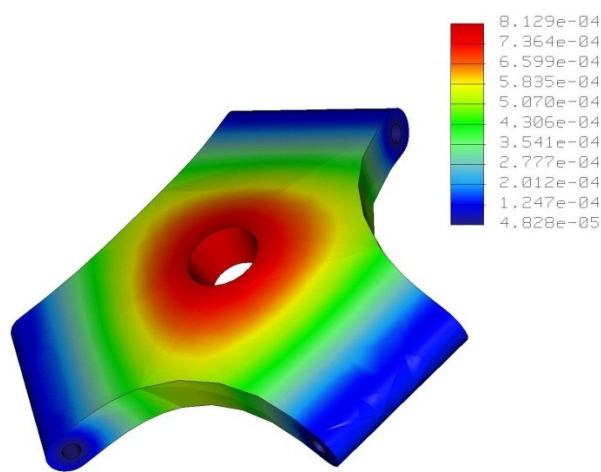
Musí zachytit síly od teleskopické kloubové hřídele, ale především od OM a přenést je na táhlo s kulovými kluby. Protože je interface deska umístěna na konci kinematického řetězce, je zde obzvlášť důležité, aby byla co nejlehčí, ale současně dostatečně tuhá. Proto je vyrobena z hliníkové slitiny o tloušťce 12 mm a kontrolována na maximální deformaci. Přesné dovolené napětí pro slitinu hliníku se nepodařilo zjistit, proto volím dovolené napětí pro hliník 30 MPa, které je nižší než u slitiny hliníku [11.].



Obr. 7.15 Uložení interface a připojení kloubového hřídele

### Pevnostní analýza interface desky

Deska musí přenést zatížení od OM a části orientačního zařízení. Tato síla je rozdělena na radiální  $F_R = 5,5 \text{ N}$  a axiální  $F_A = 26 \text{ N}$  složku. Radiální síla působí na díru a axiální na plošný region (černé šipky), který je stejně velký jako kluzná axiální podložka. Interface deska je uložena vazbou Pin Constraint v otvorech jak znázorňují šipky. Materiál interface desky je slitina hliníku s Youngovým modulem  $73084,4 \text{ MPa}$ .

Obr. 7.16 Napětí max.  $0,63 \text{ MPa}$ Obr. 7.17 Deformace max.  $8,13 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$ 

Interface deska vyhovuje: napětí činí  $0,63 \text{ MPa} < 30 \text{ MPa}$  i deformace je v dovolených mezích

## Kluzná pouzdra



Obr. 7.18 Kluzné pouzdro



Obr. 7.19 Kluzná axiální podložka

Kluzná pouzdra slouží k zachycení sil od OM a kloubového hřídele a současně umožňují rotaci interface s nízkým třením. Jejich nespornou výhodou jsou nízké pořizovací náklady. Kluzná pouzdra podle výpočetního programu uvedeného na stránkách výrobce mají životnost 85 327 hodin, což je dostatečné.

Kluzná axiální podložka přenáší axiální síly o velikosti 26 N. Kombinaci radiálních sil a axiálních sil přenáší kluzné pouzdro. Axiální složka, která působí na kluzné pouzdro je od dynamických účinků a je velmi malá.

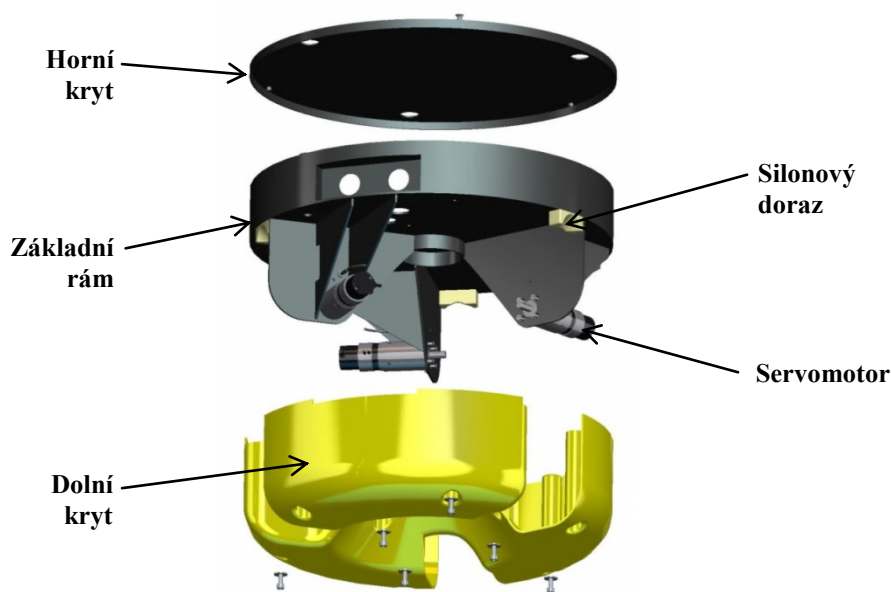
<b>Kluzná pouzdro – WFM-1618-12</b> <b>Kluzná axiální podložka - WTM-1630-015</b>		
	<b>Dovolené hodnoty</b>	<b>Působící</b>
<b>Druh pohybu</b>	Kmitavý (úhel kmitu 180°)	
<b>Max. frekvence kmitu</b>	30 1 / min	
<b>Rychlost kmitu</b>	0,05 ms <sup>-1</sup>	1,5 ms <sup>-1</sup>
<b>Max. axiální síla</b>	-	26 N
<b>Max. radilání síla</b>	-	5,5 N
<b>Max. plošný tlak</b>	60 N/mm <sup>2</sup>	0,091 N/mm <sup>2</sup>
<b>Max. tlak * rychlost</b>	0,007 N/mm <sup>2</sup> * m/s	0,92 N/mm <sup>2</sup> * m/s

Tab. 7.2

Výpočet životnosti je v příloze 4.

Více informací o kluzných pouzdrech [8.].

### 7.3. Ground



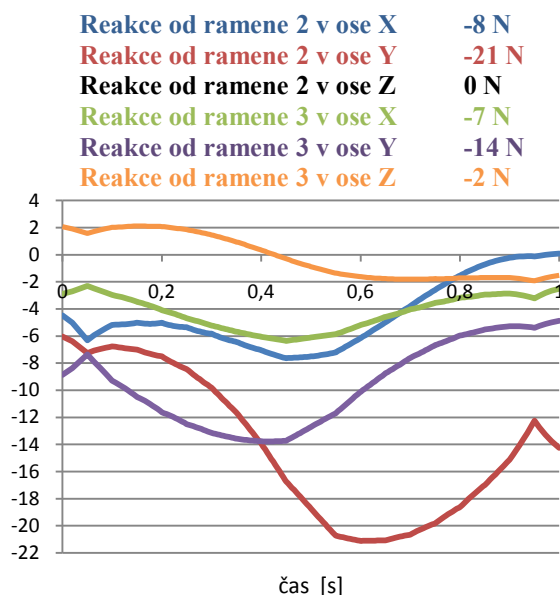
Obr. 7.20

Ground se skládá ze třech hlavních částí ze dvou krytů a nosného prvku základního rámu, viz obr. 7.20. Základní rám přenáší reakce od ramen a přes tři šrouby M12 na nosnou konzoli, ke které bude manipulátor připevněn. Kryty jsou vyrobeny z plastu. Především dolní kryt je vyroben tak, aby ho bylo v případě potřeby možné sejmout bez demontáže celého manipulátoru. Dále je rám vybaven silonovými dorazy, které zabraňují poškození při selhání elektronických dorazů.

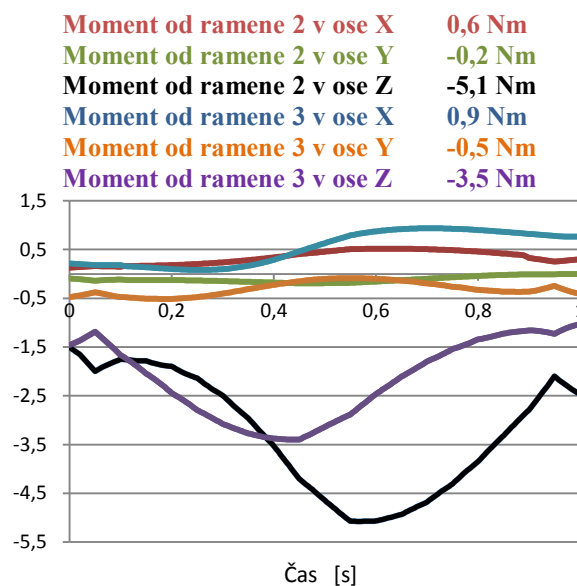
#### 7.3.1. Pevnostní analýza základního rámu

Rám je nevíce namáhanou součástí manipulátoru. Musí zachytit veškeré hmotnostní i dynamické reakce. Na grafech níže (obr. 7.21 a 7.22) jsou znázorněny průběhy zatěžujících sil a momentů, které působí na rám. Tyto síly a momenty jsou rozloženy do složek LCS. LCS je umístěn na ose díry pro připojení ramene (osa Z je osou otáčení ramene). Na obr. 7.23 je znázorněn jeden ze tří LCS, ty jsou vůči sobě otočeny o  $120^\circ$ .

Materiál rámu je ocel 11500 s Youngovým modulem 199 948 MPa. Z důvodu, že na rámu se vyskytuje mnoho způsobů převážně střídavého namáhání (krut, ohyb, tah, atd.), je dovolené maximální napětí sníženo na 60 MPa [11.].

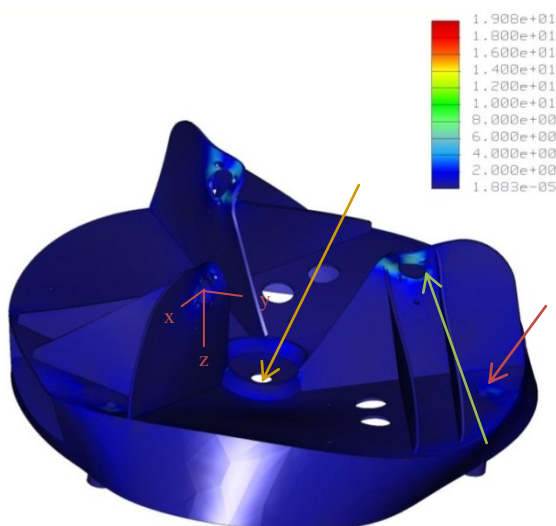


Obr. 7.21 Reakce od složek sil v LCS

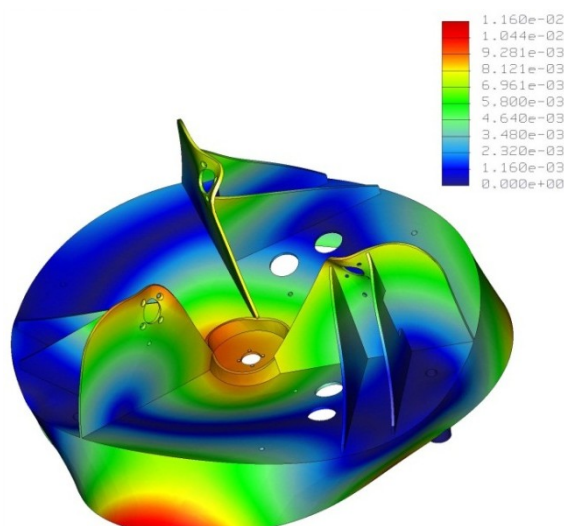


Obr. 7.22 Reakce od momentů v LCS

Momenty a síly uvedené v grafech na obr. 7.21 a 7.22 působí na plošné regiony (zelená šipka). Na tyto plošné regiony také působí ohybový moment od hmotnosti motoru, který činí 0,27 Nm okolo osy X. Orientační ústrojí zatěžuje rám v místě, kde ukazuje žlutá šipka. Síly působí na plošný region o tvaru přípojovací příruby motoru, radiálně 0,1 N a axiálně 2,5 N. Rám je uložen na třech dírách (znázorněné na obr. 7.23 červenou šipkou) vazbou, která odebere všechny stupně volnosti.

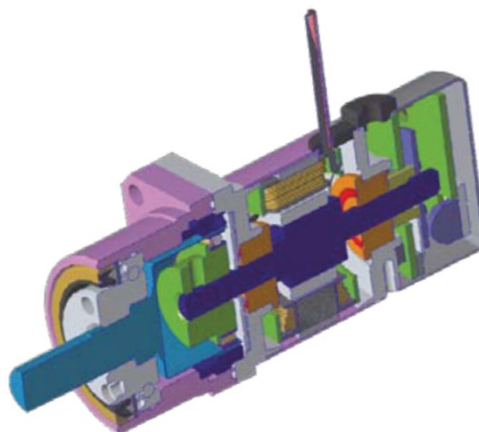


Obr. 7.23 Napětí max. 3,57 MPa

Obr. 7.24 Deformace max. 3,68<sup>-3</sup> mm

Základní rám vyhovuje: napětí činí 3,57 MPa < 60 MPa. Deformace je v dovolených mezích.

## 8. Volba pohonů



Obr. 8.1 Servomotor Harmonic Drive AG řady RSF

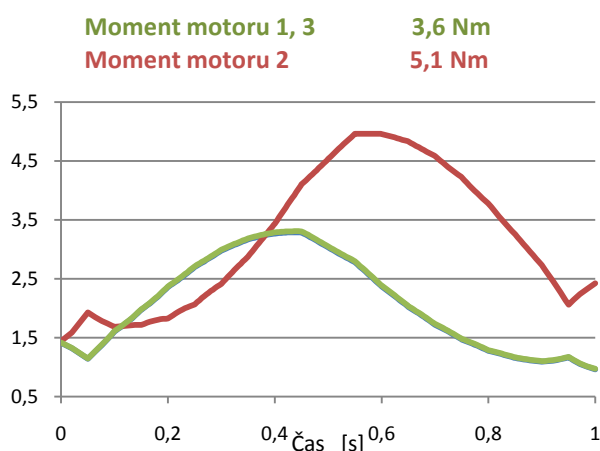
Pro obě ústrojí, jak polohové tak orientační, byl zvolen servomotor od Harmonic Drive AG řady RSF. Je to kompletní pohon s AC elektromotorem, harmonickou převodovkou, brzdou a resolverem. Výhodou kompletního pohonu je, že se takto eliminují vůle mezi jednotlivými komponenty, které mohou vznikat v sestavách.

Více informací o servomotoru Harmonic Drive RSF v [6.]

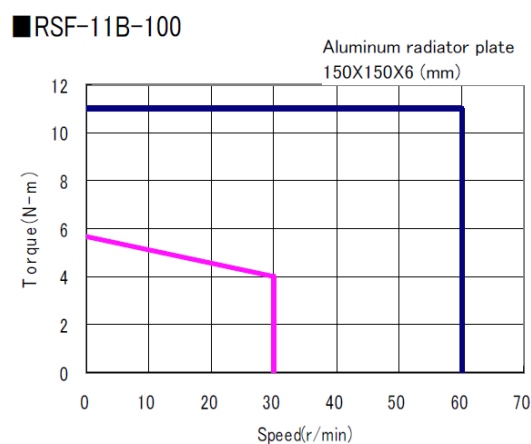
### 8.1. Servomotor polohového ústrojí

#### 8.1.1. Analýza polohového ústrojí v Pro/Engineer

Na grafu uvedeném na obr. 8.2 jsou znázorněny průběhy momentů, které jsou z analýz uvedených v kap 6.



Obr. 8.2 Průběh momentů motoru z analýzy



Obr. 8.3 Růžovou - znázorněno trvalé zatížení, modrou - maximální (krátkodobé)



Nominální moment byl zvolen z průběhu momentů uvedených na obr. 8.2. Protože neexistuje ustálený moment, byl zvolen jako nominální moment max. moment z analýzy, který činí 5,1 Nm. Současně byl porovnán s dovolenými momenty servomotoru (obr. 8.3).

### Nejnepříznivější stav

Na obr. 8.4 je znázorněn počáteční stav pro analýzu maximálního zatížení servomotoru. Nejvíce bude namáhán motor pohánějící rameno 2. Analýza je provedena tak, že koncový bod zrychluje konstantním zrychlením  $a = 5 \text{ ms}^{-2}$  svisle nahoru (ve směru červené šipky). Osa OM je vzdálena od osy manipulátoru  $t_2 = 250 \text{ mm}$ , přičemž  $t_2$  je během celé analýzy konstantní. Rameno 2 se natáčí o úhel  $\gamma =$  od  $0^\circ$  do  $40^\circ$ .



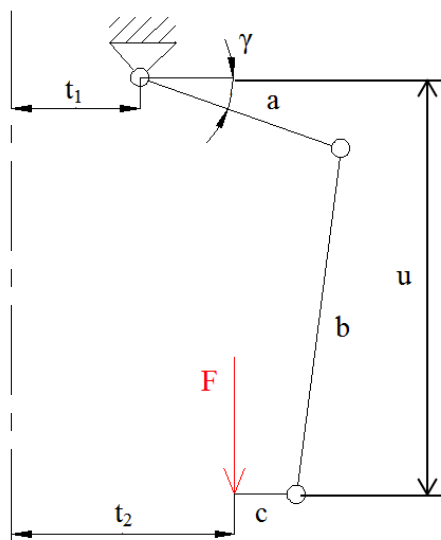
Obr. 8.4 Výchozí poloha

Výsledek je znázorněn v grafu a porovnán s analytickou kontrolou, viz obr. 8.6.

#### 8.1.2. Analytická kontrola v nejnepříznivějším stavu

Kontrola byla provedena jako statická na zjednodušeném modelu, kde je uvažováno jen jedno rameno. Průběh je stejný jako u analýzy v Pro/Engineer s tím rozdílem, že se zde uvažuje jen s ramenem 2. Matematický model byl nastaven pomocí vstupních hodnot do polohy, kdy je pohon nejvíce namáhán. Kinematické schéma je ukázáno na obr. 8.5 Obr. 8.4 Výchozí poloha. Při kontrole byla použita metoda virtuálních prací a z rovnosti výkonů pak zjištěn moment působící na hřídeli servomotoru.

Výpočet byl proveden v Mathcad 14 a je uveden v příloze 2.



Obr. 8.5

$$\begin{aligned}
 a &= 250 \text{ mm} \\
 b &= 600 \text{ mm} \\
 c &= 58 \text{ mm} \\
 t_1 &= 150 \text{ mm} \\
 t_2 &= 250 \text{ mm} \\
 F &= 33,3 \text{ N} \\
 \gamma &= 0^\circ - 40^\circ \\
 a &= 5 \text{ ms}^{-2} \\
 g &= 9,81 \text{ ms}^{-2}
 \end{aligned}$$

### Výpočet zatěžující síly

Síla  $F$  je vypočítána z hmotností pohybujících se hmot, ty činí  $= 2,25 \text{ kg}$ .

$$F = m \cdot (a + g) = 2,25 \cdot (5 + 9,81) = \underline{\underline{33,3 \text{ N}}} \quad (8.1)$$

### Závislost posuvu na pootočení ramen.

$$u(\gamma) := \sqrt{b^2 - ((t_2 + c - t_1 - a \cdot \cos(\gamma)))^2} - a \cdot \sin(\gamma) \quad (8.2)$$

### Určení převodového poměru

Z metody virtuálních prací.

$$P = \frac{d}{d\gamma} u(\gamma)$$

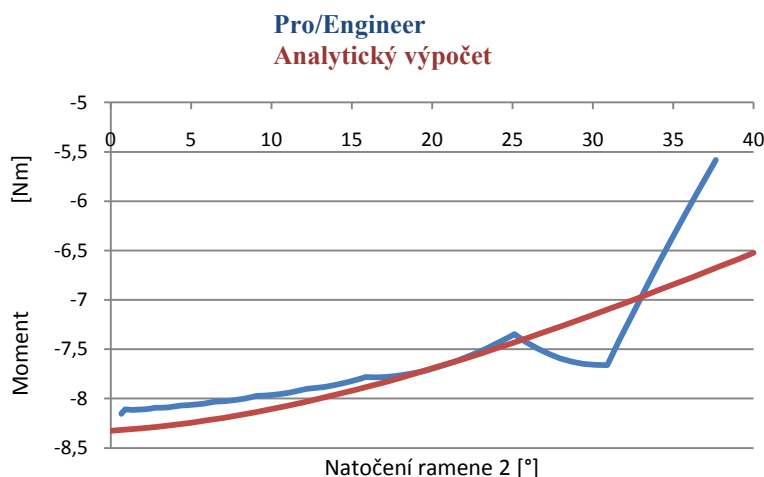
$$\frac{d}{d\gamma} u(\gamma) \rightarrow -a \cdot \cos(\gamma) - \frac{a \cdot \sin(\gamma) \cdot (c - t_1 + t_2 - a \cdot \cos(\gamma))}{\sqrt{b^2 - (c - t_1 + t_2 - a \cdot \cos(\gamma))^2}} \quad (8.3)$$

## Určení momentu

Vzorec pro výpočet momentu je odvozen z rovnice rovnosti výkonů.

$$M \cdot \omega = F \cdot v$$

$$M = \frac{F \cdot v}{\omega} = \frac{F \cdot v}{\frac{v}{P}} = F \cdot P \quad (8.4)$$



Obr. 8.6 Porovnání dynamické analýzy z Pro/Engineer a analytického výpočtu

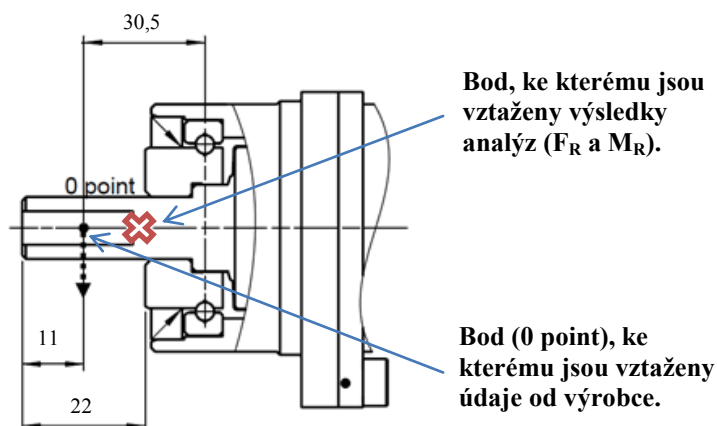
Rozdíly výsledných průběhů jsou zapříčiněné právě zjednodušením analytického modelu. Tyto rozdíly způsobují zbylá dvě ramena.

Analytická kontrola byla provedena pro ověření výsledků z Pro/Engineer. Výsledky korespondují.

### 8.1.3. Namáhání výstupního ložiska servomotoru

Kontrola ložisek na výstupu servomotoru je provedena proto, že zachytávají veškeré síly, které působí od pohybujících se hmot.

Na Obr. 8.7 je červeným křížkem znázorněno místo, ke kterému jsou provedeny analýzy. Průběh zatížení je obdobný jako při zatížení základního rámu (obr. 7.21 a 7.22). Tam jsou síly působící na hřídel servomotoru rozděleny do složek LCS. Pro tento výpočet vyhovuje zatížení rozdělené do radiálních a axiálních sil a momentů. Radiální síla je výslednicí složek X a Y  $\rightarrow F_R = 22 \text{ N}$ . Axiální síla je rovna síle v ose Z  $\rightarrow 2 \text{ N}$ . Radiální moment je výsledný z momentů kolem os X a Y  $\rightarrow M_R = 0,93 \text{ Nm}$ .



Obr. 8.7

### Přepočet síly $F_R$ na sílu do bodu „0 point“

Pro výpočet je použito rovnosti momentů vztažených k ložisku motoru. Dle [6.]

$$F_{0F} = \frac{30,5 - 11}{30,5} \cdot F_R = \frac{30,5 - 11}{30,5} \cdot 22 = 14,1 \text{ N} \quad (8.5)$$

### Přepočet momentu $M_R$ na sílu do bodu „0 point“

$$F_{0M} = \frac{M_R}{0,011} = \frac{0,93}{0,011} = 84,5 \text{ N} \quad (8.6)$$

Protože v průběhu natočení ramen se mění velikost i směr výslednic, je uvažováno s nejhorším případem a to, když jsou výslednice sil rovnoběžné.

$$F_r = F_{rF} + F_{rM} = 14,1 + 84,5 = \mathbf{98,5 \text{ N}} \quad (8.7)$$

#### 8.1.4. Kontrola ploského podélného klínu

Rameno je na výstupní hřídel servomotoru připevněno ploským podélným klínem. Toto spojení bylo zvoleno z důvodu, že servomotor je dodáván pouze s ploškou na hřídeli.

Kontrola je provedena na otláčení. K tlaku vzniklému otáčením se musí připočítat tlak, který vznikl při naražení klínu. Byla zvolena narážecí síla  $F_z = 100 \text{ N}$ . Pro klín se skosením 1 : 100 je úhel sklonu  $\alpha = 0,573^\circ$ . Dle [11].

Požadovaný krouticí moment .....	$M_k = 5,45 \text{ Nm}$
Narážecí síla .....	$F_z = 100 \text{ N}$
Úhel sklonu klínu .....	$\alpha = 0,573^\circ$
Průměr hřídele .....	$d = 10 \text{ mm}$
Šířka klínu .....	$b = 4 \text{ mm}$
Délka funkční plochy klínu .....	$l = 19 \text{ mm}$
Součinitel tření.....	$f = 0,1$
Dovolený tlak .....	$P_D = \text{pro hliník } 30 \text{ MPa}$ $P_D = \text{pro ocel } 100 \text{ MPa}$

### Výpočet tlaku od naražení klínu

$$p_h = \frac{F_z}{(tg\alpha + 2f) \cdot b \cdot l} = \frac{100}{(tg0,573 + 2 \cdot 0,1) \cdot 4 \cdot 19} \quad (8.8)$$

$$p_h = 6,27 \text{ MPa}$$

### Tečná síla

$$F_T = \frac{2M_k}{d} = \frac{2 \cdot 5,45}{10} = 545 \text{ N} \quad (8.9)$$

### Kontrola na otlačení mezi klínem a nábojem

$$p = \frac{F_T}{b \cdot l} + p_h = \frac{545}{4 \cdot 19} + 6,27 = \underline{13,44 \text{ MPa}} \quad (8.10)$$

$$p = 13,44 \text{ MPa} \leq p_D = 30 \text{ MPa}$$

### Kontrola mezi hřídelí a klínem

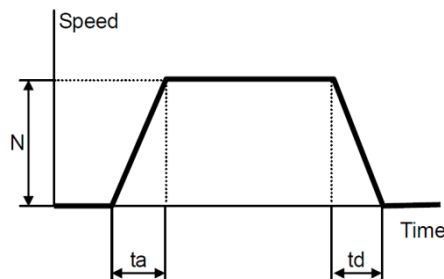
$$p = \frac{\frac{M_k}{\frac{b}{2}}}{\frac{b}{2} \cdot l} + p_h = \frac{\frac{5,45}{4}}{\frac{4}{2} \cdot 20} + 6,27 = \underline{33,52 \text{ MPa}} \quad (8.11)$$

$$p = 33,52 \text{ MPa} \leq p_D = 100 \text{ MPa}$$

Kontrola ploského klínu byla provedena a klín vyhovuje.

### 8.1.5. Kontrola dynamiky servomotoru

Výpočet je proveden dle [6.].



Obr. 8.8

Moment setrvačnosti motoru .....	$J_A = 2 \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$
Moment setrvačnosti pohyblivých hmot .....	$J_L = 9,01 \cdot 10^{-1} \text{ kgm}^2$
Rychlost otáčení .....	$n = 30 \text{ ot/min}$
Maximální krouticí moment motoru.....	$T_M = 11 \text{ Nm}$
Potřebný krouticí moment k rozpořhování soustavy .....	$T_L = 8,33 \text{ Nm}$

Moment setrvačnosti pohyblivých hmot i zatěžující moment se v závislosti na pohybu mění. Z důvodu zjednodušení se počítá s nejhorší variantou, která je znázorněna na obr. 8.4.

#### Maximální akcelerace

Čas potřebný pro zrychlení z 0 na 30 ot/min.

$$t_a = (J_a + J_L) \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{n}{T_M - T_L} = (2 \cdot 10^{-2} + 9,01 \cdot 10^{-1}) \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{30}{11 - 8,33}$$

$$\underline{t_a = 1,06 \text{ s}} \quad (8.12)$$

#### Maximální brždění

Určení ztrát servomotoru  $T_F$ .

Měrný moment .....	$K_T = 1,5 \text{ NmA}^{-1}$
Max. proud .....	$I_M = 9,4 \text{ A}$

$$T_F = K_T \cdot I_M - T_M = 1,5 \cdot 9,4 - 11$$

$$\underline{T_F = 3,1 \text{ Nm}} \quad (8.13)$$

Určení času, za který je motor schopen zastavit z počáteční rychlosti 30 ot/min.

$$t_d = (J_a + J_L) \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{n}{T_M + 2 \cdot T_F - T_L}$$

$$t_d = (2 \cdot 10^{-2} + 2,13 \cdot 10^{-4}) \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{30}{11 + 2 \cdot 3,1 - 8,33} \quad (8.14)$$

$$\underline{t_d = 0,32 \text{ s}}$$

Maximální zrychlení a zpomalení servomotoru je dostačující.

#### 8.1.6. Porovnání výsledků se zvoleným servomotorem

Harmonic Drive AG RSF – 11B -100		
	Dovolené	Požadované
<b>Max. otáčky</b>	60 ot/min	30 ot/min
<b>Max. moment</b>	11 Nm	6 Nm
<b>Nominální moment</b>	5,7 Nm	5,1 Nm
<b>Radiální zatížení výstupního hřídele</b>	245 N	99 N
<b>Axiální zatížení výstupního hřídele</b>	196 N	2 N
<b>Přesnost polohování</b>	2 arc min	-

Tab. 8.1

V tab. 8.1 je porovnání požadovaných hodnot a dovolených hodnot k vybranému servomotoru.

Byly provedeny dynamické kontroly, je-li schopen zvolený motor zrychlit při zatížení požadovaným momentem. V kap. 8.1.5 bylo vypočteno, že motor v nejnepříznivějším stavu zrychlí na rychlost 30 ot/min za 1,06 s. Tato doba zrychlení je spočítána pro počáteční polohu uvedenou na obr. 8.4. V průběhu natočení ramene dochází ke snižování potřebného krouticího momentu i momentu setrvačnosti soustavy. Proto výsledný čas zrychlení bude menší.

Zvolený motor vyhovuje ve všech kontrolách s potřebnými rezervami, které zabezpečí chod i v nepředvídatelných situacích.

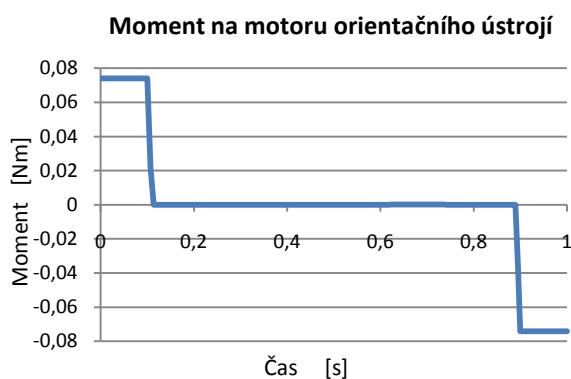
## 8.2. Servomotor orientačního ústrojí

Kontroly jsou provedeny při vychýlení kloubového hřídele o  $23^\circ$ , což odpovídá vychýlení koncového bodu od osy manipulátoru o 250 mm.

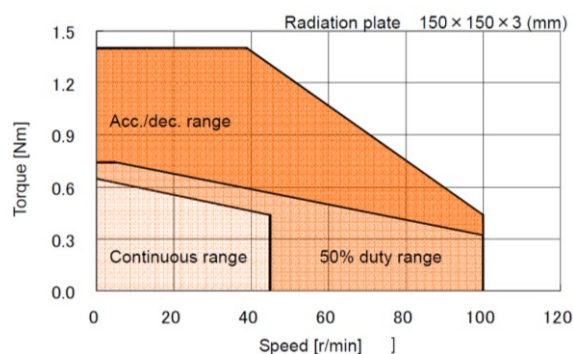
### 8.2.1. Analýza orientačního ústrojí v Pro/Engineer

Z grafu (obr. 8.9) je patrné, že zatěžující moment nejvíce působí při akceleraci a brždění. Nezávisí na tom, zda se manipulační ústrojí pohybuje či stojí. Jeho hodnota roste především s úhlem vychýlení kloubového hřídele a momentem setrvačnosti OM.

Rychlosti a zrychlení jsou uvedeny v kap. 6.



Obr. 8.9



Obr. 8.10 Dovolené zatížení servomotoru. Růžově je znázorněno trvalé zatížení, oranžově maximální (krátkodobé).

Stejně jako u polohového ústrojí i zde je problém určit nominální moment, protože nedochází k ustálenému pohybu, ale vždy jen k pootočení, jako například v analýze v kap. 6.2 o  $180^\circ$ . Proto bylo ponecháno 0,36 Nm (jsou zde již zahrnuty ztráty kloubového hřídele) jako nominální moment.



### 8.2.2. Analytická kontrola orientačního ústrojí

#### Výpočet momentu setrvačnosti OM

Rozměry OM .....  $a \times b = (0,1 \times 0,08\text{m})$

Hmotnost OM .....  $m = 1,5 \text{ kg}$

$$I = m \cdot \frac{a^2 + b^2}{12} \rightarrow 1,5 \cdot \frac{0,1^2 + 0,08^2}{12} = \underline{2,05 \cdot 10^{-3} \text{kgm}^2} \quad (8.15)$$

Moment setrvačnosti se shoduje s výsledky v Pro/Engineer.

#### Výpočet potřebného momentu pro roztočení OM

Pro analytický výpočet byla zvolena jiná rampová funkce, ale zadání plynoucí z požadavku otočení OM o  $180^\circ$  za sekundu je nezměněné.

#### Určení maximálního zrychlení

Dráha .....  $\varphi = 180^\circ \rightarrow 3,28 \text{ rad}$

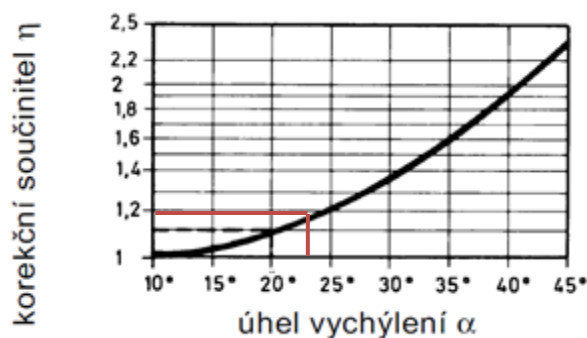
Čas .....  $t = 0,3 \text{ s}$

$$\varepsilon = \frac{\varphi}{t^2} \rightarrow \frac{3,28}{0,3^2} = 36,5 \text{ rad s}^{-2} \quad (8.16)$$

$$M_T = I \cdot \varepsilon \rightarrow 2,05 \cdot 10^{-3} \cdot 36,5 = \underline{0,075 \text{ Nm}} \quad (8.17)$$

#### Započítání ztrát na kloubovém hřídeli

Součinitel rázu  $f_z$  byl zvolen 4 z důvodu velké dynamiky manipulátoru.



Obr. 8.11

$$M_{red} = M_T \cdot f_z \cdot \eta \rightarrow 0,075 \cdot 3 \cdot 1,2$$

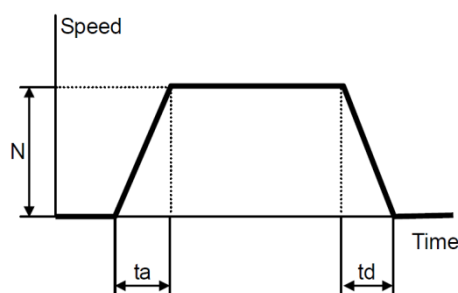
$$M_{red} = 0,36 \text{ Nm} \quad (8.18)$$

### 8.2.3. Namáhání výstupního ložiska servomotoru

Výstupní ložisko servomotoru orientačního ústrojí je namáháno především hmotností části kloubového hřídele, tedy axiálně. Hmotnost, kterou musí ložisko unést je 0,179 kg což činí 1,76 N (axiálně). Radiální síla je 0,1 N.

### 8.2.4. Kontrola dynamiky servomotoru

Výpočet je proveden dle [6.].



Obr. 8.12

Moment setrvačnosti motoru .....  $J_A = 7,31 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$

Moment setrvačnosti kloubového hřídele i s OM .....  $J_L = 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$

Rychlost otáčení .....  $n = 35 \text{ ot/min}$

Maximální krouticí moment motoru.....  $T_M = 1,4 \text{ Nm}$

Moment potřebný k rozpohybování soustavy .....  $T_L = 0,36 \text{ Nm}$

#### Maximální akcelerace

Doba, za kterou zrychlí servomotor na 35 ot/min.

$$t_a = (J_a + J_L) \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{n}{T_M - T_L} = (7,31 \cdot 10^{-4} + 2,13 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{35}{1,4 - 0,36} \quad (8.19)$$

$$\underline{t_a = 0,01 \text{ s}}$$

**Maximální brždění**

Měrný moment motoru RSF 5A .....  $K_T = 1,1 \text{ NmA}^{-1}$

Maximální proud .....  $I_M = 1,7 \text{ A}$

Určení ztrátového momentu servomotoru  $T_F$

$$T_F = K_T \cdot I_M - T_M \rightarrow 1,1 \cdot 1,7 - 1,4$$

$$T_F = 0,47 \text{ Nm} \quad (8.20)$$

Určení času, za který je motor schopen zastavit (z počáteční rychlost 35 ot/min).

$$t_d = (J_a + J_L) \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{n}{T_M + 2 \cdot T_F - T_L} =$$

$$t_d = (7,31 \cdot 10^{-4} + 2,13 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{35}{1,4 + 2 \cdot 0,47 - 0,36} \quad (8.21)$$

$$\underline{t_d = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ s}}$$

**8.2.5. Porovnání výsledků se zvoleným servomotorem**

Harmonic Drive AG RSF – 5A - 100		
	Dovolené	Požadované
Max. otáčky	100 ot/min	35 ot/min
Max. moment	1,4 Nm	0,36 Nm
Nominální moment	0,44 Nm	0,36 Nm
Radiální zatížení výstupního hřídele	90 N	0,1 N
Axiální zatížení výstupního hřídele	270 N	1,76 N
Přesnost polohování	3 arc min	-

Tab. 8.2

V tab. 8.2 je porovnání požadovaných hodnot a dovolených hodnot pro použitý servomotor Harmonic Drive AG RSF – 5A. Je vidět, že servomotor je předimenzován a to z důvodů, že nastane případ, že OM nebude uchopen v těžišti, čímž se zvýší moment setrvačnosti.

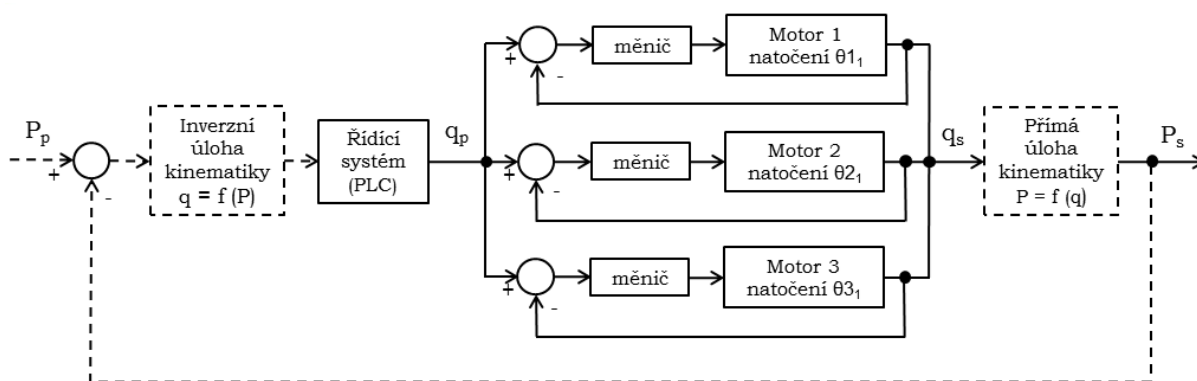
Maximální zrychlení motoru při zatížení je dostačující.

Zvolený motor vyhovuje ve všech kontrolách s potřebnými rezervami, které zabezpečí chod i v nepředvídatelných situacích.

## 9. Řízení

K řízení se předpokládá sestavení programovací platformy, která bude uložena na programovacím počítači, kde poběží inverzní úloha. Zde bude sestaven požadovaný pohyb koncového bodu manipulátoru (např. offline nebo online) a pomocí inverzní úlohy zjištěné natočení jednotlivých motorů  $\theta_{i1}$  v čase. Tyto hodnoty budou „nahrané“ do řídicího PLC, které bude hodnoty  $\theta_{i1}$  „posílat“ v čase do měničů jednotlivých motorů.

Tento typ řízení byl zvolen z důvodu nízké výpočtové kapacity PLC.



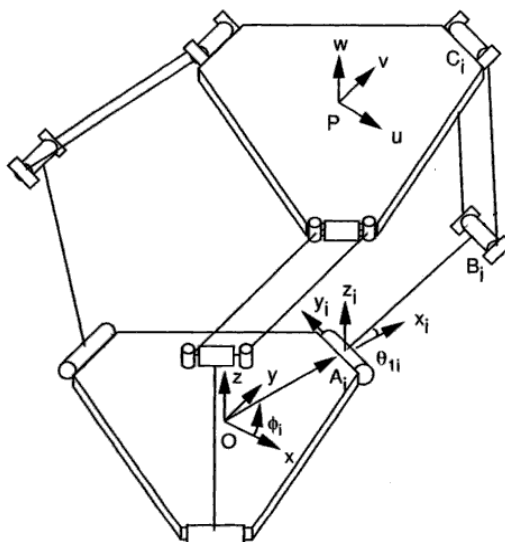
Obr. 9.1

Na obr. 9.1 je znázorněn princip řízení a programování manipulátoru.  $P_p$  je požadovaná a  $P_s$  je skutečná hodnota koncového bodu. Hodnota  $q_p$  požadovaná hodnota natočení jednotlivých motorů a  $q_s$  skutečná hodnota natočení.

Na obr. 9.1 je plnou čarou znázorněna část řízení, která „poběží“ při normálním provozu manipulátoru. Čárkovanou je znázorněno programování manipulátoru.

### 9.1. Sestavení přímé a inverzní úlohy

Sestavení přímé a následně inverzní úlohy je nezbytné pro řízení manipulátoru. Manipulátor se skládá ze tří navzájem o  $120^\circ$  pootočených kinematických řetězců, které jsou spojeny s pohyblivou platformou (interface deskou). Každý kinematický řetězec má pět stupňů volnosti, ale při jejich vzájemném spojení se počet stupňů zredukuje na tři. Kinematický řetězec má pět kloubů, ale jen jeden je aktivní s pohonem a to vždy první (na obr. 9.2 označený úhlem natočení  $\theta_{i1}$ ) zbylé klouby jsou pasivní.



Obr. 9.2 Kinematické schéma manipulátoru

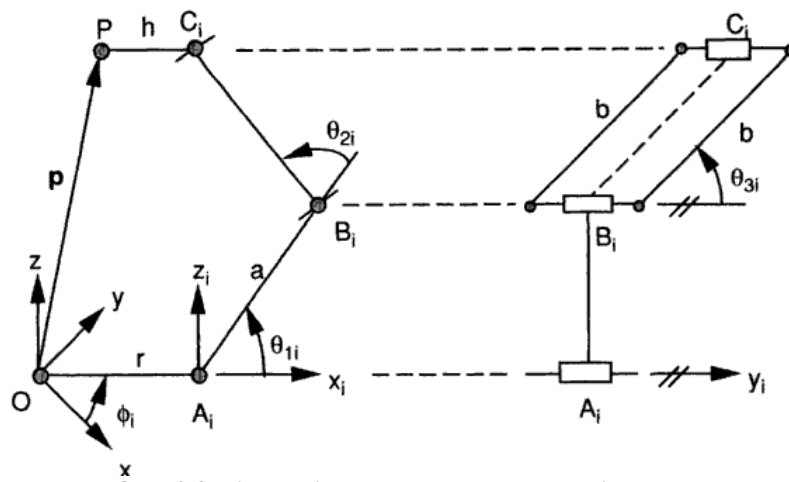
Přímá i inverzní úloha byla prováděna pro každý kinematický řetězec zvlášť. Tzn. jsou tři paralelní výpočty, které mají společné zadání a počáteční podmínky.

Níže je uvedena ukázka výpočtu přímé a inverzní úlohy. Celý výpočet je v příloze 1. a byl proveden v Mathcad. Jsou v něm uvedeny i výsledky z Pro/Engineer.

### 9.1.1. Přímá úloha

Přímá úloha kinematiky je přepočítání souřadnic ze základního souřadného systému (v našem případě z bodu  $A_i$ ) do posledního  $C_i$ , při známých velikostech natočení kinematických dvojic  $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}$ .

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = T_b^c(\theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}) \cdot \begin{bmatrix} C_{ix} \\ C_{iy} \\ C_{iz} \end{bmatrix} \quad (9.1)$$



Obr. 9.3 Kinematické schéma ramene manipulátoru

Pro matematický model bylo kinematické schéma zjednodušeno a je počítáno jen s jedním kinematickým řetězcem. Bod  $C_i$  může konat jen translační pohyb v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Natáčení bodu  $C_i$  je ve skutečnosti zabráněno spojením jednotlivých kinematických řetězců. Ve výpočtu toto otáčení eliminujeme zadáním požadovaných souřadnic. Paralelogram tvořený rameny  $b$  je ve výpočtu nahrazen nejkratší spojnici mezi  $B_i$  a  $C_i$  (na obr. 9.3 znázorněno čárkovaně) o délce stejné jako rameno  $b$ .

### Výpočet souřadnic bodu $C_i$

Natočení jednotlivých kinematických dvojic  $\theta_{in}$  známe. Je prováděn výpočet jednotlivých souřadnic bodu  $C_i$ .

$$\begin{pmatrix} C_{ix} \\ C_{iy} \\ C_{iz} \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} a \cdot \cos(\theta_1) + b \cdot \sin(\theta_3) \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ b \cdot \cos(\theta_3) \\ a \cdot \sin(\theta_1) + b \cdot \sin(\theta_3) \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad (9.2)$$

Přímá úloha byla sestavena s použitím literatury [12.]

### 9.1.2. Inverzní úloha

Známe vektor polohy  $p$  a orientace  $o$ . Zjišťujeme natočení  $\theta_{i1-3}$ .

$$w = \begin{bmatrix} p \\ o \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{inverzní úloha}} q = \begin{bmatrix} \theta_{i1} \\ \theta_{i2} \\ \theta_{i3} \end{bmatrix} \quad (9.3)$$

Inverzní úloha se skládá ze dvou základních částí. První přepočít souřadnic z bodu  $P$  do bodu  $C_i$  a druhá část zjištění natočení jednotlivých úhlů  $\theta_{i_n}$ .

Je známa transformační matice mezi GSC a LCS v bodě  $P$ . Pro výpočet úhlů natočení jednotlivých kinematických dvojic je nutné zjistit transformační matici mezi LCS v bodě  $A_i$  a LCS v bodě  $C_i$ . Popis je prováděn podle obr. 9.3.

#### Výpočet souřadnic bodu $C_i$

Indexy u jednotlivých transformačních matic znázorňují, mezi kterými body je transformační matice sestavena ( $b$  je označení počátku). Značení odpovídá obr. 9.3.

Ve výpočtu  $A_{i_n}$  je označení transformačních matic, není zde spojitost s bodem  $A_i$ .

$$A_{iAC} := A_{iBA}^{-1} \cdot T_{BP} \cdot A_{iPC}$$

$$A_{iAC} := \begin{pmatrix} \cos(\phi_i) & -\sin(\phi_i) & 0 & x_{l_{bA}} \\ \sin(\phi_i) & \cos(\phi_i) & 0 & y_{l_{bA}} \\ 0 & 0 & 1 & z_{l_{bA}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & h_{ix} \\ 0 & 1 & 0 & h_{iy} \\ 0 & 0 & 1 & h_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9.4)$$

Z výsledné transformační matice jsou důležité první tři řádky čtvrtého sloupce, kde jsou uvedeny souřadnice bodu  $C_i$ .

#### Zjištění jednotlivých úhlů $\theta_{i_n}$

Níže uvedené vzorce jsou odvozeny z průniku kruhu s koulí, z toho vyplynou i počáteční podmínky, např.  $C_{iy} \leq b$ ,  $C_{ix}^2 + C_{iz}^2 > a^2$ . Inverzní úloha platí pro hodnoty úhlů  $\theta_{i3}$  a  $\theta_{i2}$  od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  a u  $\theta_{i1}$  od  $-90^\circ$  do  $90^\circ$ . Tyto hodnoty vycházejí z inverzních goniometrických funkcí.

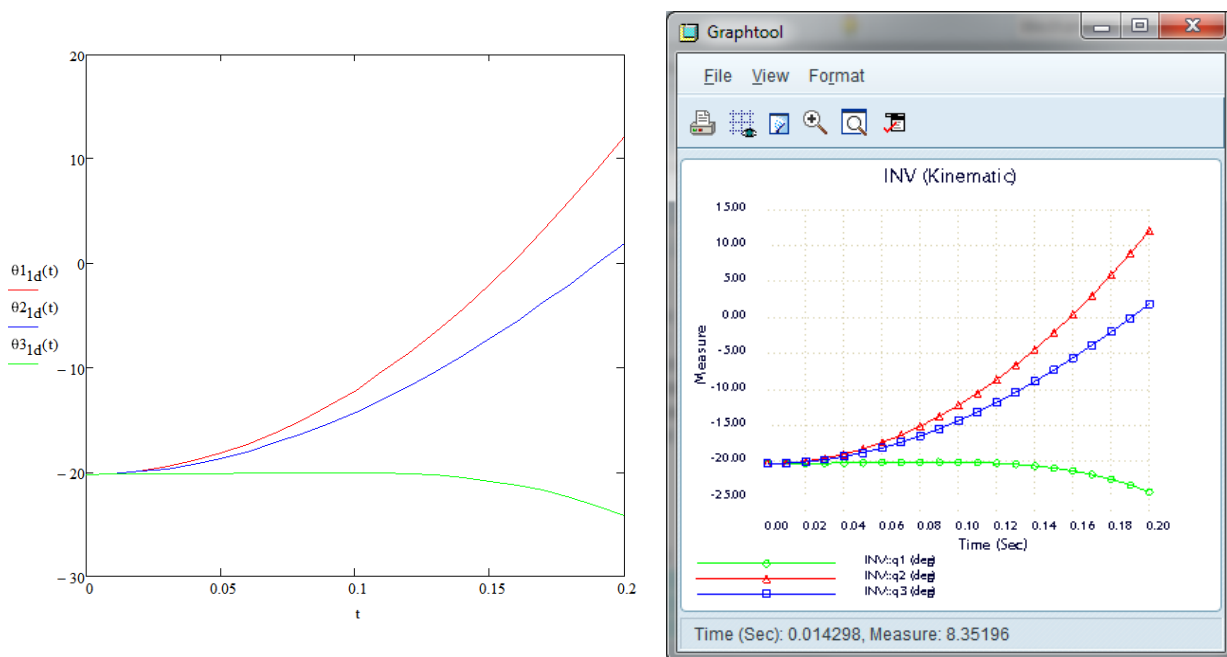
$$\theta_{i3} := \arccos\left(\frac{C_{iy}}{b}\right) \quad (9.5)$$

$$\theta_{i2} := \arccos\left[\frac{(C_{ix})^2 + (C_{iy})^2 + (C_{iz})^2 - a^2 - b^2}{2a \cdot b \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{C_{iy}}{b}\right)\right)}\right] \quad (9.6)$$

$$\theta_{i1} := -\arcsin\left[\frac{C_{ix} \cdot (b \cdot \sin(\theta_{i3}) \cdot \sin(\theta_{i2})) - C_{iz} \cdot (a + b \cdot \sin(\theta_{i3}) \cdot \cos(\theta_{i2}))}{-(a + b \cdot \sin(\theta_{i3}) \cdot \cos(\theta_{i2}))^2 - b^2 \cdot (\sin(\theta_{i3}))^2 \cdot (\sin(\theta_{i2}))^2}\right] \quad (9.7)$$

### Porovnání výsledků

K porovnání slouží kinematická analýza, jejíž počáteční podmínky jsou: Zrychlení v jednotlivých osách x,y,z 5000 mm/s<sup>2</sup>, počáteční rychlost nulová a poloha koncového bodu P = [0,0,700].



Obr. 9.4 Porovnání výsledků z analogického výpočtu s výsledky z Pro/Engineer

Výsledky inverzní úlohy jsou stejné jak v analytickém výpočtu prováděném v Mathcad, tak i v Pro/Engineer, který využívá jinou metodu výpočtu. Na základě takto ověřených výsledků je sestavená inverzní úloha správná.



## 9.2. Řídicí PLC

Pro řízení bylo zvoleno PLC SIMATIC S7 – 1200. Toto PLC je s výhodou používáno pro řízení servopohonů. Komunikuje s měniči přes PROFIBUS nebo RS485 s protokolem USS. Dokáže uřídit teoreticky až šestnáct servopohonů. Napájení je na 24VDC.

Problém je se spojitým řízením všech čtyřech motorů současně s takovou přesností, při takových hodnotách rychlostí a zrychlení jaké vyžaduje řízení manipulátoru. Z katalogového listu není možné zjistit, jestli je toto PLC vhodné pro tuto aplikaci.

Doporučuji vyzkoušet v laboratorních podmínkách po konzultaci s výrobcem možnost spojitého řízení více pohonů zde navrženým PLC.

## 9.3. Měniče

Měniče i motory jsou od stejného výrobce, aby byla zaručena kompatibilita. Měniče jsou vybaveny řadou analogových a digitálních vstupů, komunikují přes sběrnice CAN, RS232. Mají proudovou ochranu kvůli přetížení motoru. Opticky oddělené vstupy.

Technické data měničů		
	Pro orientační ústrojí <b>HA-680-4x-24</b>	Pro polohové ústrojí <b>HA-680-6x-24</b>
<b>Napájecí napětí</b>	24 V $\pm$ 15%	
<b>Nominální proud</b>	4 A	6 A
<b>Maximální proud</b>	8,4 A	16,5 A
<b>Kontrolní módy</b>	polohovací, rychlostní, momentový	
<b>Krytí</b>	IP20	

Tab. 9.1

Měniče mohou být umístěny přímo v horní části manipulátoru, ale bylo by vhodnější je umístit z hlediska údržby společně do skříně s řídicím systémem.

## 9.4. Snímače a senzory

### 9.4.1. Servomotor

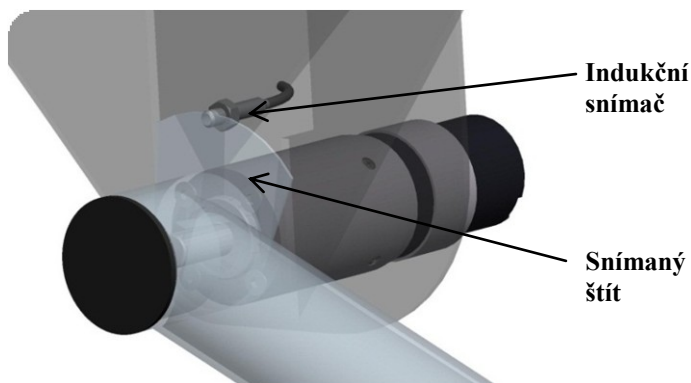
Encodery jsou součástí motoru. Rozlišení na otáčku výstupního hřídele se násobí převodovým poměrem. Pro přesnost polohování je nejen důležité rozlišení encoderu, ale i vůle např. v převodovce, v kloubech atd.

Technická data		
	RSF – 5A - 100	RSF – 11B - 100
Napájecí napětí	24 V $\pm$ 10%	
Nominální proud	0,76 A	4,9 A
Maximální proud	1,7 A	9,4 A
Rozlišení encoderu	200 000	400 000
Převodový poměr	i = 100	i = 100
Přesnost polohování	3 arc min	2 arc min

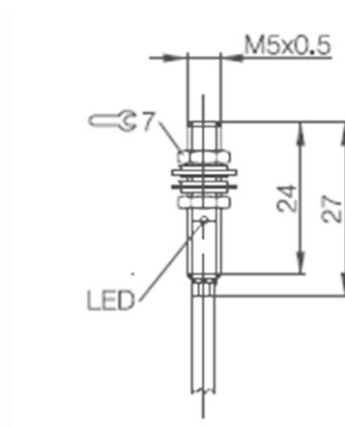
Tab. 9.2

### 9.4.2. Snímač koncové polohy

Manipulátor si prakticky vystačí se senzory, které jsou umístěny v motoru, ovšem z důvodu např. poruchy je vybaven i elektromagnetickými snímači. Tyto snímače zaznamenávají koncovou polohu jednotlivých ramen. Byl vybrán indukční snímač Balluff. Tento snímač není citlivý na vnější magnetické pole (výrobce garantuje správnou funkčnost i při instalaci v blízkosti kabelu, kde protéká 25 kA). To je důležité, protože v blízkosti snímače se nachází elektromotor.

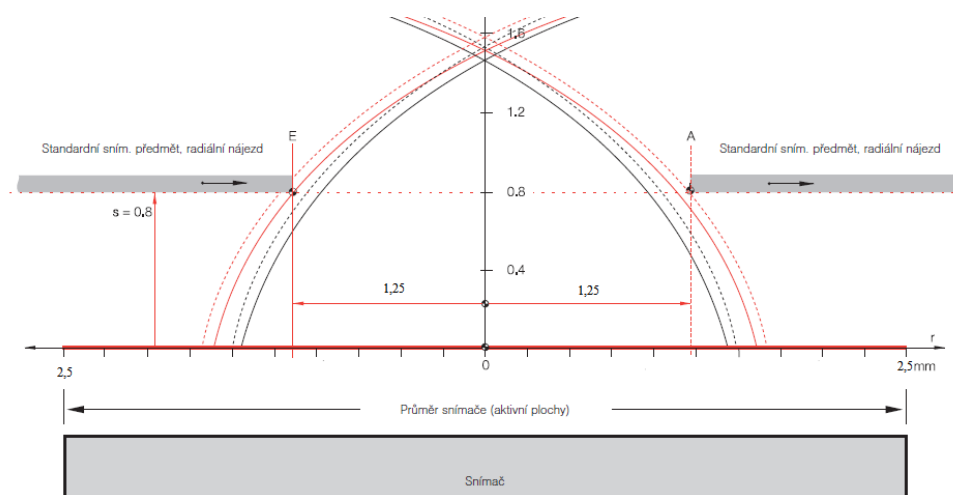


Obr. 9.5 Umístění snímače na manipulátoru



Obr. 9.6 Rozměry indukčního snímače

Indukční snímač zaznamenává štít tvaru půlměsíce, který je připevněn k rameni, viz obr. 9.5. Když snímač nezaznamená přítomnost štítu, zahlásí koncovou polohu. Snímač je zapojen tak, aby jím protékal proud právě, když zaznamenává přítomnost štítu, tzn. je zapojen jako spínací. Toto zapojení je výhodné z důvodu bezpečnosti systému. Řídicí systém „ví“, jestli není snímač nebo jeho kabeláž poškozena. Indukční snímač je použit pro získání tzv. nulového impulsu.



Obr. 9.7

Na obr. 9.7 je charakteristika radiální nájezdové křivky pro materiál Fe 360. Pro hliník a jeho slitiny je hodnota  $s$  snížena z 0,8 na 0,35 mm.

Pro sladění všech tří ramen, např. přesné vyladění nulových impulsů z důvodů výrobních tolerancí, se nabízejí tři možnosti:

- V určitých mezích vyladění vzdálenosti  $s$ , dle křivek na obr. 9.7.
- Software - zakomponovat do programu chybu polohy.
- Použití analogových indukčních snímačů. Pro každý snímač nastavit požadované "spínací" napětí.

Technické parametry indukčního snímače Balluff BES 516-3005-E4-C-PU-02	
Max. spínací vzdálenost	0,8 mm
Zaručená spínací vzdálenost	0,3 mm
Jmenovité napětí	24 V DC
Napájecí napětí	10 - 30 V DC
Jmenovitý proud	100 mA
Provozní teplota okolí	-25 až +70 °C
Krytí podle IEC 60529	IP 67

Tab. 9.3

## 10. Ekonomické zhodnocení

Ekonomické zhodnocení je zpracované ke dni 18.4.2011 kdy byl kurz eura ke koruně 24,190 Kč za euro. Ceny jsou uvedeny bez DPH. Ceny vyráběných komponent jsou odhadnuty z ceny materiálu, výrobní náročnosti a režie.

	Komponent	Objednací číslo	Počet	€ / ks	Kč / ks	Cena
1	<b>Základní rám</b>		1		2 500,0	2 500,0
2	<b>Horní kryt</b>		1		550,0	550,0
3	<b>Spodní kryt</b>		1		950,0	950,0
4	<b>Rameno</b>		3		2 000,0	6 000,0
5	<b>Interface deska</b>		1		550,0	550,0
6	<b>interface příruba</b>		1		450,0	450,0
7	<b>Táhlo</b>		6		350,0	2 100,0
8	<b>Doraz</b>		3		50,0	150,0
9	<b>Rozpěrná TR 6,5</b>		6		25,0	150,0
10	<b>Spojovací TR</b>		1		150,0	150,0
11	<b>Polohového ústrojí Servomotor</b>	RSF-11B-100-F100-24B-C	3	990	23 948,1	71 844,3
	Kabel motoru	EWC-MB03-A06-TN2	3	66	1 596,5	4 789,6
	Kabel encoderu	EWB-F03-M0809-3M14	3	289	6 990,9	20 972,7
	HA-680 - servoměnič	HA-680-6B/RSF-11B-50-F	3	531	12 844,9	38 534,7
12	<b>Orientačního ústrojí Servomotor</b>	RSF-5A-100-E050-C	1	1,337	32,3	32,3
	Kabel motoru	EWA-M03-JST04-TN2	1	68	1 644,9	1 644,9
	Kabel encoderu	EWA-E03-M09-3M14	1	169	4 088,1	4 088,1
	HA-680 - servoměnič	HA-680-4B/RSF-5A-30-E050	1	740	17 900,6	17 900,6
	Programovací kabel	HDM-RS232C	4	72	1 741,7	6 966,7
13	<b>Indukční snímač Balluff</b>	BES 516-3005-E4-C-PU-02	3	39	943,4	2 830,2
14	<b>Kloubová hřídel</b>	HUCO-POL G16BC Ni	1	76	1 838,4	1 838,4
15	<b>Kloubová hlavice</b>	KBRM – 08 CL MH	12		168,0	2 016,0
16	<b>Kluzné pouzdro</b>	WFM-1618-12	1		125,0	125,0
17	<b>Axiální kluzná podložka</b>	WTM-1832-015	1		124,0	124,0
18	<b>Záslepka <math>\varnothing</math> 40</b>		6		20,0	120,0
19	<b>KLIN 4 x 4 x 19</b> ČSN 02 2514		3		18,0	54,0
20	<b>ŠROUB M6 x 20</b> ISO 4762 - 8.8		12		2,5	30,2
21	<b>ŠROUB M6 x 25</b> ISO 4762 - 8.8		6		3,0	17,9
22	<b>ŠROUB M2 x 5</b> ISO ČSN 02 1151		3		0,2	0,7

23	<b>ŠROUB M2 x 9</b> ČSN 02 1151		4		0,3	1,2
24	<b>ŠROUB M4 x 10</b> ČSN 02 1151		12		0,5	5,4
25	<b>ŠROUB M6 x 16</b> ČSN 02 1151		3		1,6	4,8
26	<b>ŠROUB M3 x 5</b> ISO 4766 - 22H		8		0,4	3,4
27	<b>MATICE M5</b> ISO 4035		3		0,6	1,9
28	<b>MATICE KM 2</b> ČSN 02 3630		1		25,0	25,0
29	<b>PODLOŽKA MB 2</b> ČNS 02 3640		1		18,0	18,0
30	<b>PODLOŽKA φ 6</b> ČSN 02 1729		6		3,3	19,5
31	<b>PODLOŽKA φ 15</b> ISO 7089		1		8,5	8,5
	<b>Cena celkem</b>		<b>131</b>			<b>187 568,1</b>
32	<b>PLC SIMATIC S7 – 1200</b>		1			22 800
	<b><u>Kompletní cena bez DPH</u></b>		<b><u>132</u></b>			<b><u>210 368,1</u></b>

Tab. 10.1

Záměrně byla oddělena cena řídicího systému od vlastního manipulátoru z důvodu, objektivního porovnání cen manipulátorů.

Celkové náklady na manipulátor i s řídicím systémem jsou 210 370 Kč.

Do této ceny není zahrnuta montáž plus další položky jako kabely, skříň pro řídicí systém a měniče atd., které náklady na manipulátor zvýší.

## 11. Závěr

Byl vypracován konstrukční návrh manipulátoru s paralelní kinematickou strukturou. Manipulátor byl zkonstruován tak, aby splňoval dnešní trendy v robotice. Dynamické vlastnosti: rychlost  $1 \text{ ms}^{-1}$  a zrychlením  $5 \text{ ms}^{-2}$ , přesnost polohování  $0,1 \text{ mm}$ . Náklady na výrobu manipulátoru činí  $210\,370 \text{ Kč}$ .

Při konstrukci byl kladen důraz na minimalizaci setrvačných hmot a současně zachování tuhosti. Byly použity moderní materiály, jako karbon či plasty. Bezúdržbový provoz je zaručen samomaznými plastovými pouzdry a kulovými hlavicemi Iglidur.

Nejdůležitějšími komponenty manipulátoru jsou servopohony. Ty byly zvoleny od firmy Harmonic Drive AG. Pohony svými vlastnostmi po všech stránkách vyhovují dané aplikaci, jediným problémem je pořizovací cena, která činí více jak  $2/3$  ceny manipulátoru.

Byla sestavena inverzní úloha pro danou kinematickou strukturu. Skládá se ze dvou typů výpočtu. Přepočtu souřadnic s pomocí transformačních matic a pak zjištění úhlu natočení jednotlivých kloubů. Jedná se prakticky o tři paralelní výpočty, každý pro jeden kinematický řetězec. Správnost výpočtů byla ověřena shodnými výsledky z Pro/Engineer.

Kvůli snížení nákladů bylo pro řídicí systém použito PLC. Bylo zvoleno rychlostní řízení. Uvažuje se, že v PLC budou nahrané požadované hodnoty natočení jednotlivých motorů v čase pro konkrétní úlohu a ty následně posílané do měničů jednotlivých pohonů.

Před realizací by bylo vhodné odzkoušení a odladění na prototypu. Není totiž jisté, že při tak velkém zrychlení, rychlosti a požadavku na přesnost polohování bude řízení PLC vyhovovat. Problém je především v synchronizaci jednotlivých pohonů.

## 12. Použitá literatura

- [1.] ABB [online]. 2009 [cit. 2011-05-01]. [www.abb.com](http://www.abb.com). Dostupné z WWW: <<http://www.abb.com/product/seitp327/cf1b0a0847a71711c12573f40037d5cf.aspx?productLanguage=cz&country=00>>.
- [2.] AUTHOR, s.r.o. [online]. 2010 [cit. 2011-05-01]. [Http://www.author.cz](http://www.author.cz). Dostupné z WWW: <<http://www.author.cz/jak-vybrat-kolo/technologies/author-karbon/>>.
- [3.] BLAŽEK, Jaroslav. *Polohovací měnič SINAMICS S110 s připravenými bloky pro S7-1200. Projekty průmyslové automatizace, odborné texty a novinky* [online]. 30.11.2010, [cit. 2011-05-01]. Dostupný z WWW: <[http://www.blaja.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=460&Itemid=5](http://www.blaja.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=460&Itemid=5)>.
- [4.] FANUC ROBOTICS [online]. 2009 [cit. 2011-05-01]. [Www.fanucrobotics.cz](http://www.fanucrobotics.cz). Dostupné z WWW: <[http://www.fanucrobotics.cz/cs/Products/A\\_Industrial-Robots/M-1iA.aspx](http://www.fanucrobotics.cz/cs/Products/A_Industrial-Robots/M-1iA.aspx)>.
- [5.] GÜDEL AG [online]. 2010 [cit. 2011-05-01]. [www.gudel.com](http://www.gudel.com). Dostupné z WWW: <<http://www.gudel.com/modules/3-axis-type-fp/size-fp-1/>>.
- [6.] HARMONIC DRIVE AG [online]. 20.9.2009 [cit. 2011-05-11]. [www.harmonicdrive.de](http://www.harmonicdrive.de). Dostupné z WWW: <<http://www.harmonicdrive.de/english/products/servo-motors-servo-actuators-and-controllers/rsf/rating-table.html>>.
- [7.] HUCO [online]. 2010 [cit. 2011-05-12]. [Www.huco.com](http://www.huco.com). Dostupné z WWW: <<http://www.huco.com/products.asp?p=true&cat=208>>.
- [8.] IGUS [online]. 2010 [cit. 2011-05-11]. [Www.igus.de](http://www.igus.de). Dostupné z WWW: <<http://igus.de>>.
- [9.] *Klouby, kloubové hřídele*. In *Technická příručka* [online]. [s.9.], 2005 [cit. 2011-05-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.citace.com/generator.php?druh=4&ukol=1>>.

- [10.] KUKA Roboter CEE GmbH [online]. 2011 [cit. 2011-05-01]. Www.kuka.com. Dostupné z WWW: <[http://www.kuka-robotics.com/czech\\_republic/cs/products/industrial\\_robots/small\\_robots/kr5\\_scara\\_r350/start.htm](http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/products/industrial_robots/small_robots/kr5_scara_r350/start.htm)>.
- [11.] LEINER, J., VÁVRA, P. *Strojnické tabulky. 2 vydání*. Praha: Albra, 2006. 903s. ISBN 80 – 7078 – 204 – 5.
- [12.] LUNG-WEN, Tsai. *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*. Canada : Wiley-IEEE, 1999. 505 s. ISBN 0-471-32593-7.
- [13.] RAVEO [online]. 10.12.2010 [cit. 2011-05-07]. Www.raveo.cz. Dostupné z WWW: <<http://raveo.cz/servo-motor-ecostep>>.
- [14.] SCHUNK [online]. 2011 [cit. 2011-05-12]. Www.schunk.com. Dostupné z WWW: <<http://www.schunk-modular-robotics.com/>>.



## 13. Seznam příloh

1. Inverzní úloha manipulátoru
2. Analytický výpočet průběhu namáhání pohonu
3. Výpočet životnosti kulové hlavice
4. Výpočet životnosti kluzného pouzdra
5. Sestavný výkres DP-TRIBOT-S-01 K (Autodesk AutoCad 2004)
6. 3D-model efektoru TRIBOT(Pro/Engineer Wildfire 5.0)  
V modelu jsou uloženy veškeré analýzy, které byly prováděny (pevnostní, kinematické, dynamické)